

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Antonio Petrak**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Darko Landek, dipl. ing.

Student:

Antonio Petrak

Zagreb, 2018.

*Izjavljujem da sam ovaj završni rad izradio samostalno uz stručnu pomoć izv. prof. dr. sc. Darka Landeka, koristeći znanja stečena tijekom studija te navedenu literaturu i rezultate dobivene ispitivanjem u eksperimentalnom dijelu.*

*Zahvaljujem se svima koji su mi pomagali prilikom izrade ovog rada, iskrena zahvala doc.dr.sc. Gorani Baršić i dr.sc. Saši Kovačiću na pruženoj pomoći u eksperimentalnom dijelu rada. Posebno se zahvaljujem mentoru izv. prof. dr. sc. Darku Landeku na strpljenju, savjetima i pruženoj stručnoj pomoći.*

*Najviše od svega zahvaljujem se svojoj obitelji, roditeljima, sestri i bratu koji su mi ljubavlju i podrškom tijekom studija omogućili da dođem do još jednog uspjeha u svojem životu.*

Antonio Petrak



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Antonio Petrak** Mat. br.: 0035198947

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Modificiranje i prevlačenje površine prstena kliznog ležaja od čelika DIN 100Cr6**  
Naslov rada na engleskom jeziku: **Surface modification and coating of a sliding bearing ring made of steel DIN 100Cr6**  
Opis zadatka:

Prsteni kliznog ležaja izloženi su visokim dinamičkim naprezanjima, kontaktnim pritiscima i trošenju. Odgovarajućim postupcima modificiranja i prevlačenja površina prstena kliznih ležaja moguće je značajno povisiti otpornost na kontaktne pritiske i trošenje.

U teorijskom dijelu rada treba opisati proračun kontaktnog pritiska u prstenu kliznog ležaja, zahtjeve na svojstva jezgre i površinskog sloja ležaja te prikladne postupke modificiranja i prevlačenja površine za ležajeve izrađene od čelika DIN 100Cr6.

U eksperimentalnom dijelu rada treba planirati i provesti nitrokarburiranje u solnoj kupci TENIFER, nitriranje u plazmi i prevlačenje prevlakom TiN/TiCN na prstenu kliznog ležaja od čelika DIN 100Cr6. Na toplinski obrađenim uzorcima provesti ispitivanje hrapavosti površine, mikrotvrdoće površine i otpornosti na adhezijsko trošenje.

Na temelju provedenih ispitivanja i diskusije rezultata predložiti postupak toplinske obrade za povišenje otpornosti na adhezijsko trošenje.

U radu treba navesti korištenu literaturu i dobivenu stručnu pomoć

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Rok predaje rada:

1. rok: 23. veljače 2018.  
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.  
3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.  
2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.  
3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Darko Landek

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

<b>SADRŽAJ .....</b>	<b>I</b>
<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>III</b>
<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>VI</b>
<b>POPIS OZNAKA.....</b>	<b>VII</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>VIII</b>
<b>SUMMARY.....</b>	<b>IX</b>
<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>TEORIJSKI DIO.....</b>	<b>2</b>
<b>2. TRIBO SUSTAV KLIZNOG LEŽAJA.....</b>	<b>3</b>
2.1. DIJELOVI KLIZNOG LEŽAJA .....	3
2.2. TRENJE KOD KLIZNIH LEŽAJEVA .....	4
2.3. PRINCIP RADA KLIZNIH LEŽAJEVA.....	6
2.4. KLIZNI LEŽAJEVI S HIDROSTATIČKIM PODMAZIVANJEM.....	7
2.5. KLIZNI LEŽAJEVI S HIDRODINAMIČKIM PODMAZIVANJEM .....	8
2.6. PRORAČUN RADIJALNIH KLIZNIH LEŽAJEVA S HIDRODINAMIČKIM PODMAZIVANJEM .....	11
2.6.1. DEFINIRANJE POJMOVA POTREBNIH ZA PRORAČUN.....	11
2.7. ZAHTJEVI NA MATERIJAL KLIZNIH LEŽAJEVA.....	18
<b>3. MODIFICIRANJE I PREVLAČENJE ČELIKA DIN 100Cr6 .....</b>	<b>21</b>
3.1. ČELIK DIN 100Cr6.....	21
3.1.1. TOPLINSKA OBRADA ČELIKA DIN 100CR6 .....	21
3.2. OPISI POSTUPKA MODIFICIRANJA I PREVLAČENJA PRSTENA KLIZNOG LEŽAJA.....	26
3.2.1. NITROKARBURIRANJE U SOLNOJ KUPCI TENIFER.....	26
3.2.2. NITRIRANJE U PLAZMI.....	27
3.2.3. PREVLAČENJE PREVLAKOM TiN/TiCN POSTUPKOM PACVD.....	29
<b>4. METODE ISPITIVANJA .....</b>	<b>33</b>

4.1. HRAPAVOST POVRŠINE .....	33
4.2. MIKROTVRDOĆA .....	35
4.3. METODA BLOK NA PRSTENU .....	35
<b>EKSPERIMENTALNI DIO .....</b>	<b>37</b>
<b>5. PLAN I PROVEDBA ISPITIVANJA .....</b>	<b>38</b>
5.1. PLAN ISPITIVANJA .....	38
5.2. PROVEDBA MODIFICIRANJA I PREVLAČENJA.....	39
5.2.1. NITROKARBURIRANJE U SOLNOJ KUPCI TENIFER.....	39
5.2.2. NITRIRANJE U PLAZMI.....	40
5.2.3. PREVLAČENJE PREVLAKOM TiN/TiCN POSTUPKOM PACVD.....	40
<b>6. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA REZULTATA .....</b>	<b>43</b>
6.1. ISPITIVANJE HRAPAVOSTI POVRŠINE .....	43
6.3. ISPITIVANJE OTPORNOSTI NA ADHEZIJSKO TROŠENJE .....	51
<b>7. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>57</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>58</b>
<b>PRILOG I: HRAPAVOSTI POVRŠINA.....</b>	<b>59</b>
<b>PRILOG II: REZULTATI ISPITIVANJA OTPORNOSTI NA ADHEZIJSKO TROŠENJE.....</b>	<b>64</b>

## POPIS SLIKA

Slika 2. 1. Dijelovi kliznog ležaja [1].....	3
Slika 2. 2. Vrste trenja klizanja prema stanju površina nalijeganja [1].....	5
Slika 2. 3. Skica hidrostatičkog podmazivanja [1].....	6
Slika 2. 4. Skica hidrodinamičkog podmazivanja: a) kod zakrivljenih površina i b) kod ravnih površina [1].....	6
Slika 2. 5. Princip rada aksijalnog kliznog ležaja s hidrostatičkim podmazivanjem [1].....	7
Slika 2. 6. Raspodjela tlaka u nosivom uljnom sloju kod prstenastog aksijalnog ležaja s hidrostatičkim podmazivanjem [1].....	8
Slika 2. 7. Nastanak uljnog sloja u radijalnom kliznom ležaju [1] .....	9
Slika 2. 8. Položaj rukavca u ležaju pri hidrodinamičkom podmazivanju radijalnog kliznog ležaja u zavisnosti o kutnoj brzini, $\omega$ [1].....	10
Slika 2. 9. Stribeckova krivulja koja prikazuje karakteristiku promjene faktora trenja kao funkciju kutne brzine rukavca [1] .....	10
Slika 2. 10. Položaji definiranih pojmova potrebnih za proračun [1] .....	12
Slika 2. 11. Prikaz porasta tlaka koji se može postići u uljnom sloju [1] .....	13
Slika 2. 12. Raspodjela tlaka $p$ u nosivom uljnom sloju po obodu radijalnog kliznog ležaja pod djelovanjem konstantnog opterećenja $F$ [1] .....	14
Slika 2. 13. Raspodjela tlaka $p$ u nosivom uljnom sloju u aksijalnom smjeru: a) za konačnu i za beskonačnu širinu ležaja $B$ , b) za nagnuto vratilo i c) za savijeno vratilo [1] ..	15
Slika 2. 14. Opterećena projekcijska površina ležaja [1] .....	15
Slika 2. 15. Utjecaj promjene srednjeg pritiska $p_{sr}$ na Stribeckovu krivulju [1] .....	16
Slika 2. 16. Relativna debljina uljnog sloja ovisno o Sommerfeldovom broju $S_0$ i karakteristici ležaja $B/D$ [1].....	17
Slika 3. 1. Koraci postupka obrade čelika DIN 100Cr6 [6] .....	21
Slika 3. 2. Postupak toplinske obrade čelika DIN 100Cr6 [4] .....	22
Slika 3. 3. Kontinuirani TTT dijagram čelika DIN 100 Cr6 proizvođača – Ovako ( $\vartheta_A=860$ °C, 10 minuta) [7] .....	24
Slika 3. 4. Kontinuirani TTT dijagram čelika DIN 100 Cr6 proizvođača – IMS ( $\vartheta_A=850$ °C) [8] .....	24
Slika 3. 5. Dijagram popuštanja čelika DIN 100Cr6 proizvođača – Ovako ( $\vartheta_A=840$ °C, hlađen u ulju i popušten 1h) [7] .....	25
Slika 3. 6. Dijagram popuštanja čelika DIN 100Cr6 proizvođača – IMS ( $\vartheta_A=850$ °C, hlađen u ulju i popušten 2h) [8] .....	25
Slika 3. 7. Izgled nitriranog sloja [10].....	27
Slika 3. 8. Mikrostruktura zone spojeva koja se može postići nitriranjem u plazmi [10].....	28
Slika 3. 9. Uređaj za nitriranje u plazmi [10] .....	29
Slika 3. 10. Shematski prikaz PACVD uređaja [11] .....	30
Slika 3. 11. PACVD uređaj Rubig 70/90 instaliran na FSB-u .....	31

Slika 3. 12. Ovisnost faktora trenja o putu trošenja TiN prevlake i austenitnog nehrđajućeg čelika kao kontrapara, primjenom metode Blok na prstenu: a) korištenjem normalne sile od 2 N, b) korištenjem normalne sile od 10 N [13] .....	32
Slika 4. 1. Referentna duljina profila $l$ , srednje aritmetičko odstupanje profila $Ra$ i srednje kvadratno odstupanje profila $Rq$ [3] .....	33
Slika 4. 2. Prosječna visina neravnina [3] .....	34
Slika 4. 3. Najveća visina profila $R$ , najveća visina izbočine profila $Rp$ i najveća dubina izbočine profila $Rm$ [3] .....	34
Slika 4. 4. Ispitivanje mikrotvrdoće metodom Vickers: a) princip ispitivanja, b) izgled indentora [14] .....	35
Slika 4. 5. Prikaz metode Bloka na prstenu [15] .....	36
Slika 5. 1. Prikaz prstena kliznog ležaja u polaznom stanju [16] .....	38
Slika 5. 2. Dijagram postupka nitrokarburiranja u solnoj kupci TENIFER .....	39
Slika 5. 3. Dijagram postupka nitriranja u plazmi .....	40
Slika 5. 4. Dijagram prevlačenja prevlakom TiN/TiCN postupkom PACVD .....	41
Slika 5. 5. Dijagram generiranja napona plazme i vremena pauze .....	41
Slika 6. 1. Parametri hrapavosti za prstene .....	43
Slika 6. 2. Izgled profila hrapavosti za polazno stanje prstena kliznog ležaja .....	44
Slika 6. 3. Izgled profila hrapavosti za prsten kliznog ležaja nitrokarburiran postupkom TENIFER .....	44
Slika 6. 4. Izgled profila hrapavosti za prsten kliznog ležaja prevučen prevlakom TiN/TiCN postupkom PACVD .....	44
Slika 6. 5. Parametri hrapavosti za kontraparove .....	45
Slika 6. 6. Izgled profila hrapavosti za a) kontrapar 1, b) kontrapar 2 .....	45
Slika 6. 7. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51 i uzorak zaliven u polimernu masu .....	46
Slika 6. 8. Debljina zone spojeva: a) unutrašnji dio prstena, b) vanjski dio prstena .....	47
Slika 6. 9. Raspon tvrdoće od ruba prema jezgri za unutarnji dio prstena .....	48
Slika 6. 10. Raspon tvrdoće od ruba prema jezgri za vanjski dio prstena .....	49
Slika 6. 11. Kalibracija opruge uređaja za ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje .....	51
Slika 6. 12. Ovisnost faktora trenja o putu trošenja za sva četiri tribo sustava kod normalne sile $F_N=60$ N .....	52
Slika 6. 13. Ovisnost faktora trenja o putu trošenja za sva četiri tribo sustava kod normalne sile $F_N=120$ N .....	53
Slika 6. 14. Prsteni nakon ispitivanja na adhezijsko trošenje: a) polazni prsten, b) prsten nitrokarburiran u solnoj kupci TENIFER, c) prsten nitriran u plazmi postupkom PACVD, d) prsten prevučen prevlakom TiN/TiCN postupkom PACVD, e) kontrapar .....	55
Slika 6. 15. a) Uređaj za ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje i b) Stereo mikroskop Leica MZ6 .....	55
Slika 6. 16. Prikazi tragova trošenja snimljene stereo mikroskopom Leica MZ6: a) prsten u polaznom stanju, b) prsten nitrokarburiran postupkom TENIFER, c) prsten prevučen prevlakom TiN/TiCN, d) prsten nitriran u plazmi .....	56



Slika 8. 1. Profil hrapavosti i parametri polaznog prstena kliznog ležaja .....	59
Slika 8. 2. Profil hrapavosti i parametri prstena kliznog ležaja nitrokarburiranog u solnoj kupci TENIFER.....	60
Slika 8. 3. Profil hrapavosti i parametri prstena kliznog ležaja prevučenog prevlakom TiN/TiCN postupkom PACVD .....	61
Slika 8. 4. Profil hrapavosti i parametri kontrapara kvadra 1. ....	62
Slika 8. 5. Profil hrapavosti i parametri kontrapara kvadra 2. ....	63
Slika 8. 6. Polazni rezultati ispitivanja otpornosti na adhezijsko trošenje metodom Blok na prstenu za opterećenje $F_N=60$ N .....	64
Slika 8. 7. Polazni rezultati ispitivanja otpornosti na adhezijsko trošenje metodom Blok na prstenu za opterećenje $F_N=120$ N .....	65
Slika 8. 8. Vrijednost faktora trenja o putu trošenja za $F_N=60$ N za triboparove: a) TiCN - neprevučeno, b) TiCN – nitrokarburirano TENIFER, c) TiCN – nitrirano u plazmi, d) TiCN – prevučeno TiCN .....	66
Slika 8. 9. Vrijednost faktora trenja o putu trošenja za $F_N=120$ N za triboparove: a) TiCN - neprevučeno, b) TiCN – nitrokarburirano TENIFER, c) TiCN – nitrirano u plazmi, d) TiCN – prevučeno TiCN .....	67

## POPIS TABLICA

Tablica 2. 1. Iskustvene vrijednosti za koeficijent trenja u kliznim ležajevima i preporučljivo mazivo [2].....	18
Tablica 3. 1. Kemijski sastav čelika DIN 100Cr6 proizvođača – Ovako [7] .....	23
Tablica 3. 2. Kemijski sastav čelika DIN 100Cr6 proizvođača – IMS [8] .....	23
Tablica 3. 3. Karakteristike postupka nitrokarburiranja u solnoj kupci TENIFER [10] .....	26
Tablica 3. 4. Karakteristike postupka nitriranja u plazmi [10].....	28
Tablica 5. 1. Plan ispitivanja .....	38
Tablica 5. 2. Parametri procesa nitrokarburiranja u solnoj kupci TENIFER .....	39
Tablica 5. 3. Parametri nitriranja u plazmi .....	40
Tablica 5. 4. Osnovi parametri prevlačenja TiN/TiCN postupkom PACVD.....	42
Tablica 6. 1. Vrijednost parametara hrapavosti za prstene .....	43
Tablica 6. 2. Vrijednost parametara hrapavosti za kontraparove .....	45
Tablica 6. 3. Rezultati ispitivanja jezgre prstena nitrokarburiranog u solnoj kupci TENIFER.....	48
Tablica 6. 4. Rezultati ispitivanja tvrdoće za unutarnji dio prstena .....	48
Tablica 6. 5. Rezultati ispitivanja tvrdoće za vanjski dio prstena .....	49
Tablica 6. 6. Rezultati ispitivanja tvrdoće za rub prstena nitriranog u plazmi.....	49
Tablica 6. 7. Rezultati ispitivanja tvrdoće za rub prstena nitrokarburiranog u solnoj kupci TENIFER.....	50
Tablica 6. 8. Vrijednosti sile savijanja opruge u postupku kalibracije .....	51
Tablica 6. 9. Srednji faktor trenja ispitnih prstena pri normalnom opterećenju 60 i 120 N.....	54

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$B$	m	Nazivna širina ležaja
$D$	m	Nazivni promjer ležaja (unutarnji promjer)
$D$	$\mu\text{m}$	Vanjski promjer otiska
$d$	m	Promjer rukavca ležaja
$d$	$\mu\text{m}$	Unutarnji promjer otiska
$e$	m	Ekscentricitet
$F$	N	Radikalna sila
$h_0$	m	Debljina uljnog sloja
$h_{lim}$	m	Empirička minimalna dopuštena debljina uljnog sloja
$h_{min}$	m	Minimalna debljina uljnog sloja
$p$	Pa	Lokalni tlak uljnog sloja
$p_m$	Pa	Srednji površinski pritisak u ležaju
$p_{m,dop}$	Pa	Dopušteni srednji površinski pritisak u ležaju
$p_{max}$	Pa	Najveći tlak koji se može postići u uljnom sloju
$p_{sr}$	Pa	Srednji pritisak u ležaju
$R$	m	Središnja udaljenost blazinice ležaja
$r$	m	Središnja udaljenost rukavca ležaja
$Ra$	$\mu\text{m}$	Srednje aritmetičko odstupanje profila
$R_{max}$	$\mu\text{m}$	Najveća visina neravnina
$R_z$	$\mu\text{m}$	Srednja visina neravnina
$S_o$	-	Sommerfeldov broj
$Z$	m	Apsolutna zračnost ležaja $\epsilon$
$\epsilon$	1	Relativni ekscentricitet
$\eta$	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	Dinamička viskoznost ulja
$\mu$	-	Faktor trenja
$\psi$	1	Relativna zračnost ležaja
$\omega$	$\text{s}^{-1}$	Kutna brzina

## SAŽETAK

U radu su ispitani mogućnosti modificiranja i prevlačenja površine prstena kliznog ležaja od čelika DIN 100Cr6. Provedeni su postupci nitrokarburiranja u solnoj kupci TENIFER, nitriranje u plazmi i prevlačenje TiN/TiCN postupkom PACVD. Ispitana je hrapavost površine, mikrostruktura rubnog sloja i faktor trenja. Iz analize mikrostrukture uočena je različita debljina zone spojeva i debljina nitriranja na vanjskom i unutrašnjem dijelu prstena. Iz ispitivanja faktora trenja u triboparu ispitni prsten – kvadar prevučen PACVD prevlakom TiN/TiCN utvrđeno je da kod opterećenja normalnom silom od 60 N najveći faktor trenja utvrđen je u polaznom stanju prstena, a najmanji na prstenu prevučenom PACVD prevlakom TiN/TiCN. U drugom slučaju kod opterećenja normalnom silom od 120 N najveći faktor trenja utvrđen je na prstenu prevučenom PACVD prevlakom TiN/TiCN, a najmanji na prstenu nitriranom u plazmi.

Ključne riječi: prsten kliznog ležaja, nitrokarburiranje TENIFER, nitriranje u plazmi, DIN 100Cr6, PACVD,

## SUMMARY

The paper examines the possibilities of modifying and coating the surface of the sliding bearing ring of steel DIN 100Cr6. Nitrocarburizing procedures were performed in the TENIFER solvents, plasma nitration and TiN / TiCN PACVD coating. Surface roughness, the microstructure of the surface layer and the friction factor were investigated. From the microstructure analysis, different thickness of the bonding zone and the thickness of nitration on the outer and inner ring part were observed. From test of the friction factor in the tribo pair, the test ring - block coated with PACVD TiN / TiCN loaded with a normal force of 60 N it was determined that the largest friction factor was in the starting condition and in the case of the smallest ring coated with the PACVD TiN / TiCN. In the second case, with the load of 120 N, the largest friction factor was found in the ring coated with PACVD TiN / TiCN and the smallest ring nitrated in plasma.

Key words: sliding bearing ring, nitrocarburizing TENIFER, nitrated in plasma, DIN 100Cr6, PACVD

## 1. UVOD

Klizni ležajevi su strojni elementi koji omogućavaju vođenje pokretnih dijelova strojeva i prijenos opterećenja s rukavca osovine ili vratila na blazinicu ležaja. Pri tome su klizne površine podmazane uljem, a u rjeđim situacijama mastima ili krutim sredstvima za podmazivanje. Upravo zbog toga prsteni kliznih ležajeva su opterećeni visokim dinamičkim naprezanjima, kontaktnim pritiscima i naravno trošenju. Različitim postupcima modificiranja i prevlačenja moguće je značajno poboljšati svojstva prstena kliznog ležaja od čelika DIN 100Cr6.

Prsten kliznog ležaja koji se koristi u ovom radu je standardni prsten koji se kupuje kao zamjenski dio ležaja. Dobije se u poboljšanom stanju, prethodno kaljen i popušten, te bez ikakve prevlake. Čelik od kojeg se izrađuje DIN 100Cr6 pripada skupini niskolegiranih alatnih čelika za hladni rad, odnosno podskupini niskolegiranih Cr čelika. To je grupa čelika s 1 do 1,5 %C i 0,5 do 1,5 %Cr i primjena im je osim dijelova kotrljajućih ležaja, kao što su na primjer prsteni, kuglice i valjci, također i za izradu različitih alata od kojih možemo spomenuti alate za obradu drveta, mramora, noževe za papir i kožu, manja svrdla i tako dalje.

U radu će se provesti nitrokarburiranje u solnoj kupci TENIFER, nitriranje u plazmi i prevlačenje prevlakom TiN kao podsloj i TiCN kao sloj primjenom postupka PACVD (eng. plasma assisted chemical vapour deposition), odnosno plazmom potpomognuto kemijsko prevlačenje iz parne faze, na prstenima kliznog ležaja od čelika DIN 100Cr6. Te će se na temelju ispitivanja hrapavosti površine, mikrotvrdoće površine i otpornosti na adhezijsko trošenje sa metodom Blok na prstenu (eng. Block on ring) neprevučenih i prevučenih prstena, predložiti najbolji postupak toplinske obrade za povišenje otpornosti na adhezijsko trošenje.

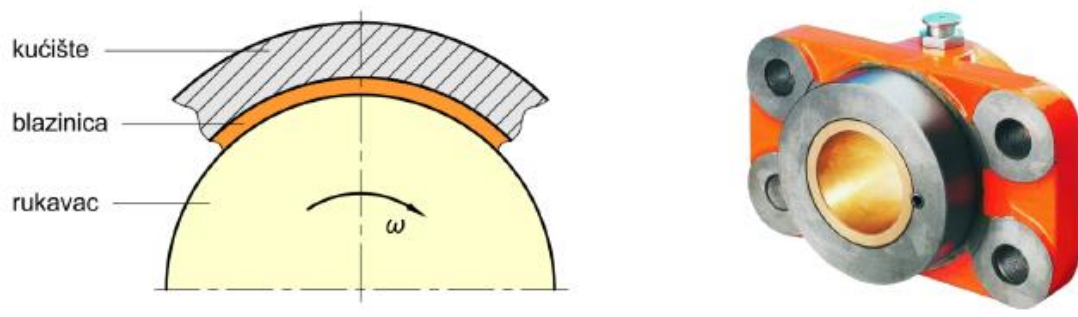
## **TEORIJSKI DIO**

## 2. TRIBO SUSTAV KLIZNOG LEŽAJA

Kao što je navedeno u uvodu ležajevi su strojni elementi koji omogućavaju vođenje pokretnih dijelova strojeva i prijenos opterećenja između dijelova koji se nalaze u relativnom međusobnom gibanju. Postoji nekoliko vrsta podjela ležajeva. Prva podjela je s obzirom na način vođenja, gdje spadaju linearni, rotacijski, linearno-rotacijski i sferni. Druga je s obzirom na smjer prenošenja opterećenja, pa imamo: 1. Radijalni (poprečni) ležaj, 2. Aksijalni (uzdužni) ležaj i 3. Radijalno-aksijalni (poprečno-uzdužni) ležaj. I zadnja podjela je podjela ležajeva s obzirom na vrstu trenja gibanja, u koju spadaju klizni ležajevi i valjni ležajevi [1]. U nastavku ovog poglavlja detaljno će biti prikazani dijelovi kliznih ležajeva, moguće trenje koje se javlja u njima, te proračun kliznog ležaja.

### 2.1. DIJELOVI KLIZNOG LEŽAJA

Kod kliznog ležaja blazinice u mirovanju se izravno dodiruju s kliznim plohamu rukavca, a djeluju na principu trenja klizanja, što se može vidjeti iz slike 2.1.



Slika 2. 1. Dijelovi kliznog ležaja [1]

Dakle kliznim ležajevima se ostvaruje neposredan prijenos opterećenja s rukavca na blazinicu. Pri tome su klizne površine podmazane uljem, a u rjeđim situacijama mastima ili krutim sredstvima za podmazivanje. Neke prednosti kliznih ležajeva su sljedeće: omogućavaju velike brzine vrtnje, imaju miran i tihi hod, njihova izrada je jednostavna, koriste se kod udarnih opterećenja, nisu osjetljivi na prašinu, njihova izrada je jeftinija od valjnih ležajeva, zauzimaju manje mjesta u radijalnom smjeru, sa slojem ulja između dijelova prigušuju vibracije, šumove i udarce, samim time uz dobro podmazivanje imaju nizak faktor trenja, te praktički neograničen vijek trajanja, mogu biti izrađeni u dijeljenoj verziji.

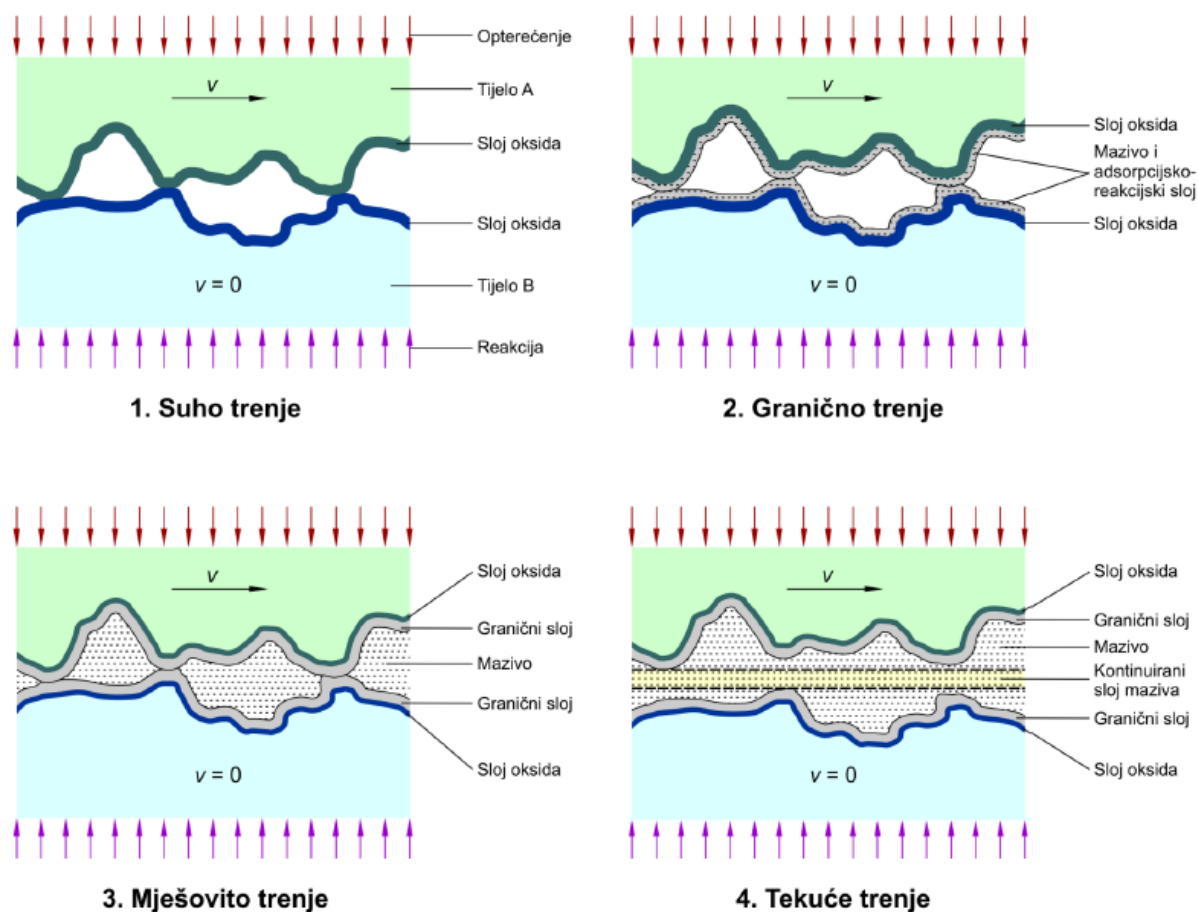


Naravno kao i kod ostalih strojnih elemenata tako i kod kliznih ležajeva postoje nedostaci, a to su: prilikom pokretanja i malih brzina dolazi do velikog trenja, neprecizno vođenje, odnosno pozicioniranje pokretnih strojnih dijelova, imamo jako veliku potrošnju maziva, osjetljivi su ako dođe do nedostatka podmazivanja, moraju se pažljivo održavati i uređivati, kod vertikalnog vratila su komplicirane izvedbe konstrukcija, na kvalitetu jako utječu materijal i toplinska obrada vratila ili osovine.

## **2.2. TRENJE KOD KLIZNIH LEŽAJEVA**

Kada govorimo o trenju kod kliznih ležajeva, ono je jako bitno, jer uz dobro podmazivanje dijelova ostvaruje se nizak faktor trenja, a samim time praktički neograničen vijek trajanja kliznih ležajeva. Uz to prilikom pokretanja i malih brzina vrtnje, dolazi do velikog trenja, a zbog toga do pojačanog trošenja dijelova, pri čemu treba osigurati odgovarajuće i u skladu sa izvedbom najbolje pomazivanje. Zato su osjetljivi na nedostatak podmazivanja, a potrošnja maziva je velika. Slojem ulja se prigušuju udarci, vibracije i šumovi.

Prema [3], trenje je sila ili otpor koja se suprotstavlja relativnom kretanju krutih tijela u dodiru. Djeluje paralelno s dodirnim površinama, a smjer joj je suprotan smjeru relativnog kretanja. Dakle za ostvarivanje relativnog gibanja između dodirnih ploha treba savladati silu trenja. Kod kliznih ležajeva promatramo vanjsko trenje, koje se prema podmazivanju može podijeliti na: suho trenje i na trenje uz pomazivanje [3]. Mogući slučajevi koji se kod te vrste trenja javljaju prikazani su na slici 2.2.



Slika 2. 2. Vrste trenja klizanja prema stanju površina naliježanja [1]

Suho trenje nastaje kada između površina koje naliježu jedna na drugu nema dodirnog sloja (maziva ili sredstva za podmazivanje). Faktor trenja ovisi o stanju površine i vrsti materijala, a ne ovisi o brzini, niti o veličini površina koje naliježu jedna na drugu.

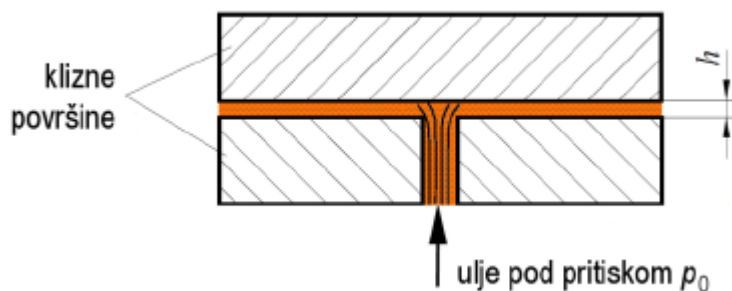
Granično trenje je trenje koje nastaje kada su površine u dodiru prekrivene tankim, ali tvrdim graničnim slojem maziva, oksida, vlage i nečistoća, a dodiruju se samo u najizbočenijim točkama površinskih neravnina. Također se može povezati sa trenjem pokretanja, odnosno posebnim slučajem graničnog trenja, s posebno visokim faktorom graničnog trenja, koje nastaje kod jako malih brzina vrtnje pri kojima se granični sloj probija na velikom broju mjesta.

Mješovito trenje je prijelazni oblik između graničnog i tekućeg trenja kod kojeg se površine koje naliježu jedna na drugu dodiruju preko graničnih slojeva, a pritisak maziva još uvijek ne može u potpunosti razdvojiti te dvije površine.

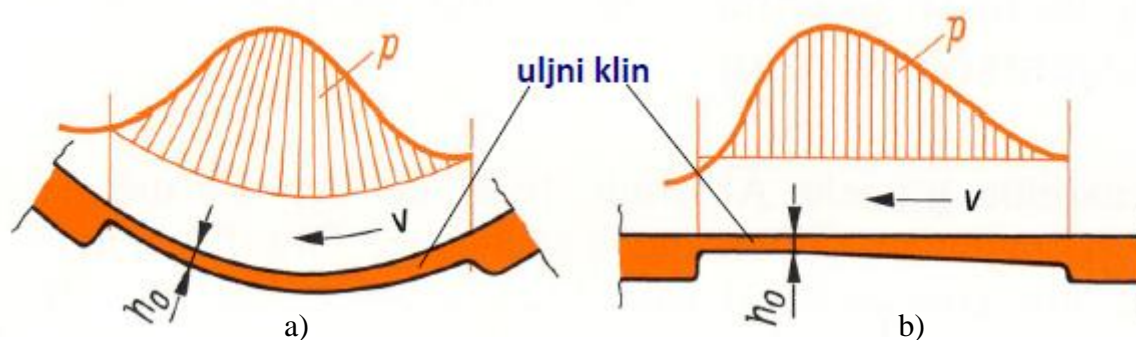
Kod tekućeg trenja površine koje naliježu jedna na drugu se ne dodiruju, a vrhove izbočenih površinskih neravnina razdvaja kontinuirani sloj maziva.

### 2.3. PRINCIP RADA KLIZNIH LEŽAJEVA

Kod kliznih ležajeva nastojimo osigurati tekuće trenje, a da bi takvo trenje mogli postići potrebno je u sloju maziva osigurati tlak koji omogućava ravnotežno stanje s vanjskim opterećenjem ležaja, a to se postiže odgovarajućim načinom podmazivanja. S obzirom na način postizanja tekućeg trenja imamo hidrostatsičko podmazivanje (slika 2.3.) i hidrodinamičko podmazivanje (slika 2.4.).



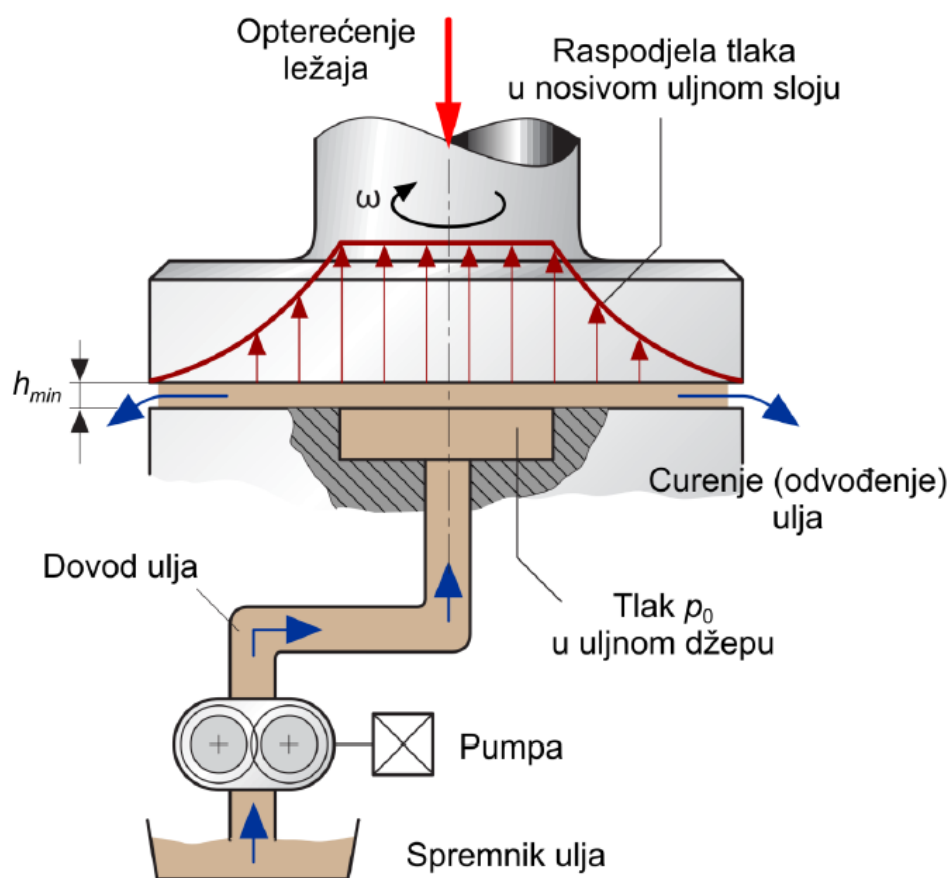
Slika 2. 3. Skica hidrostatsičkog podmazivanja [1]



Slika 2. 4. Skica hidrodinamičkog podmazivanja: a) kod zakrivljenih površina i b) kod ravnih površina [1]

## 2.4. KLIZNI LEŽAJEVI S HIDROSTATIČKIM PODMAZIVANJEM

Na slici 2.5. može se vidjeti princip rada aksijalnog kliznog ležaja s hidrostatičkim podmazivanjem. Visokotlačna pumpa u sloju maziva osigurava potrebni tlak, te tlači ulje na  $p_0=20$  Mpa, što je približna vrijednost od 200 bar, kako bi se osigurala minimalna vrijednost dopuštene debljine uljnog sloja  $h_{min}$ . Prednost takvog kliznog ležaja sa hidrostatičkim podmazivanjem je što su gubici trenja manji nego kod ostalih vrsta ležajeva. Zbog velikog dodatnog troška za visokotlačnu pumpu u praksi se malo upotrebljavaju.

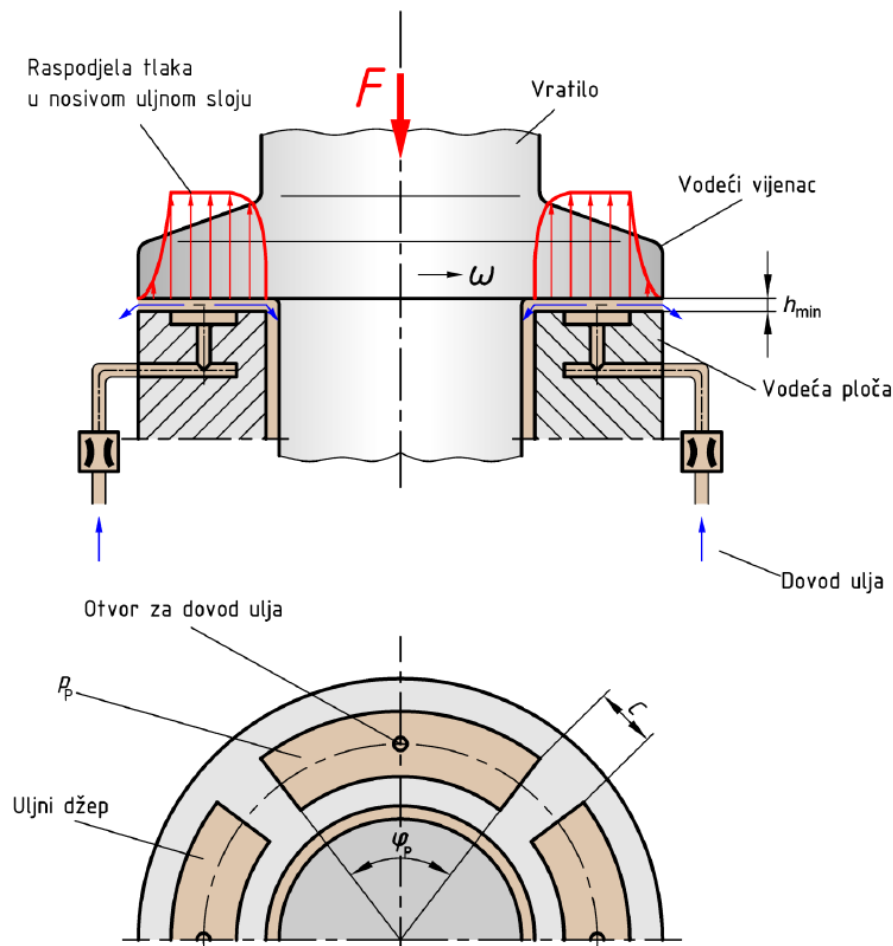


Slika 2. 5. Princip rada aksijalnog kliznog ležaja s hidrostatičkim podmazivanjem [1]

Gdje je:  $p_0$  - tlak u uljnom džepu,

$h_{min}$  - minimalna dopuštena vrijednost uljnog sloja.

Ukoliko se radi o aksijalnom prstenastom kliznom ležaju s hidrostatskim podmazivanjem raspodjela tlaka u nosivom uljnom sloju je nešto drugačija što se vidi na slici 2.6., u odnosu na klasični aksijalni klizni ležaj s hidrostatskim podmazivanjem (slika 2.5.).

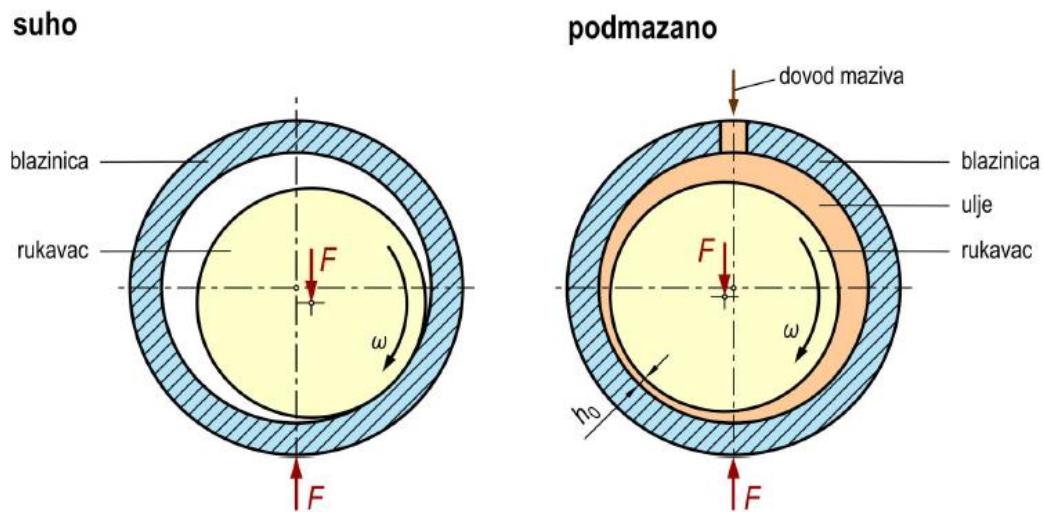


**Slika 2. 6. Raspodjela tlaka u nosivom uljnom sloju kod prstenastog aksijalnog ležaja s hidrostatskim podmazivanjem [1]**

## 2.5. KLIZNI LEŽAJEVI S HIDRODINAMIČKIM PODMAZIVANJEM

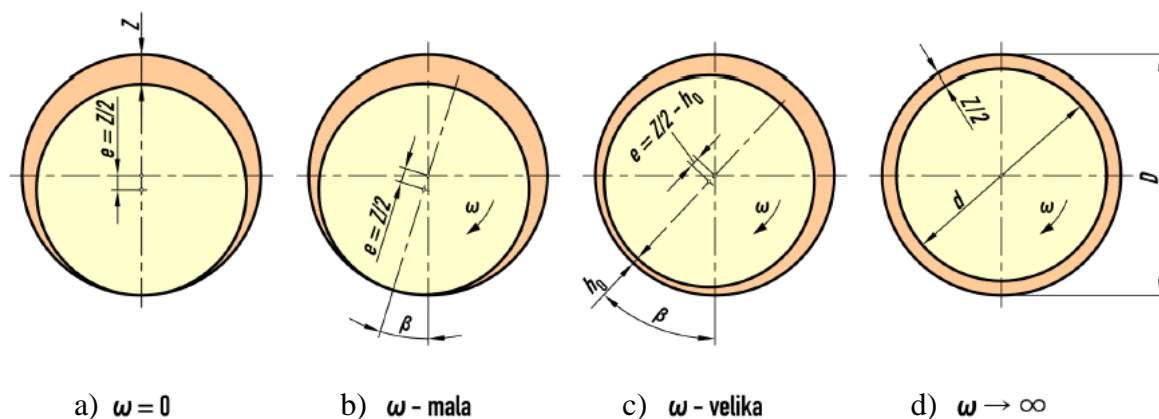
Kod radijalnog kliznog ležaja s hidrodinamičkim podmazivanjem, nosivi uljni sloj se stvara zbog toga što površina rukavca nosi ulje u klinasti procijep odnosno uljni klin i tamo ga tlači, pri čemu brzina klizanja mora biti dovoljno velika. Samim time u procijepu raste tlak koji premješta tj. zanosi rukavac u jednu stranu, a onda ga podiže tako da pliva u uljnom sloju debljine  $h_0$ . Dakle gibanjem odnosno rotacijom rukavca stvara se potrebni tlak za nošenje rukavca. Cijeli taj proces nastanka nosivog uljnog sloja u radijalnom kliznom ležaju za slučaj

suhog i trenja uz podmazivanje prikazan je na slici 2.7.



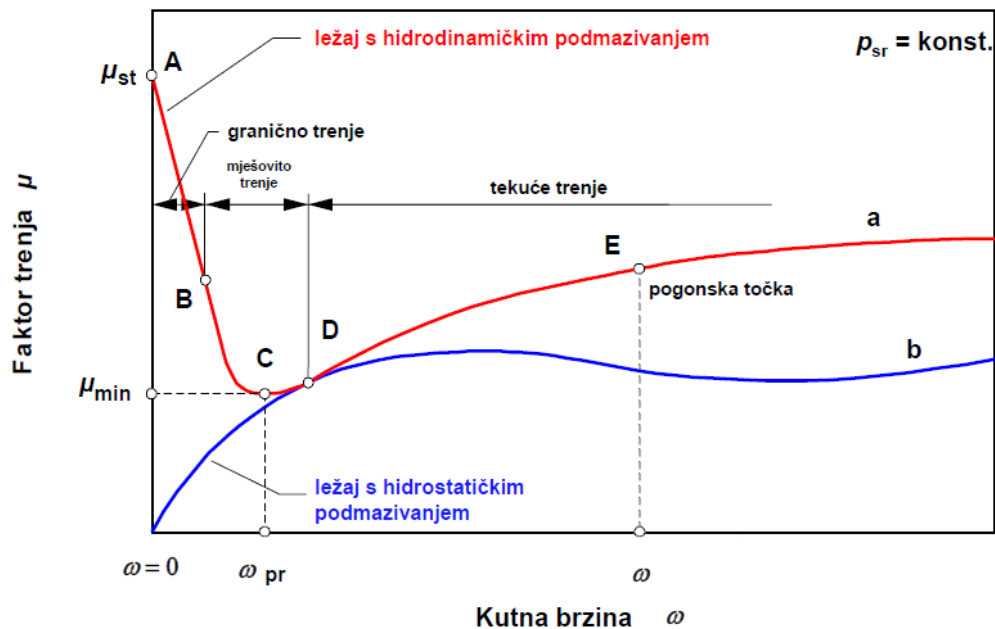
Slika 2. 7. Nastanak uljnog sloja u radijalnom kliznom ležaju [1]

Kako bi se bolje pojasnio postupak nastajanja nosivog uljnog sloja, kod trenja uz podmazivanje, ilustrativno je prikazan na slici 2.8. U stanju mirovanja kada je  $\omega=0$ , rukavac leži ekscentrično u blazinici ležaja, stvarajući klinasti procjep, (slika 2.8. a). Prostor između blazinice i rukavca je stalno ispunjen uljem. Kada se rukavac počne okretati, suho trenje prvo prelazi u mješovito trenje. Površina rukavca nosi ulje i tlači ga u klinasti procjep, te zbog toga raste tlak koji rukavac premješta u jednu stranu. Tlak se povećava porastom brzine vrtnje, te se rukavac diže i počinje plivati na tako stvorenom uljnom sloju, (slika 2.8. b). Mješovito trenje na taj način prelazi u tekuće trenje, a brzina vrtnje pri kojoj se događa taj prijelaz naziva se prijelazna brzina vrtnje. Ukoliko brzina vrtnje raste, smanjuje se ekscentricitet (slika 2.8. c), a kod zamišljene beskonačno velike brzine vrtnje rukavac bi rotirao u centru u blazinici (slika 2.8. d).



Slika 2. 8. Položaj rukavca u ležaju pri hidrodinamičkom podmazivanju radijalnog kliznog ležaja u zavisnosti o kutnoj brzini,  $\omega$  [1]

Karakteristiku promjene faktora trenja u ovisnosti o kutnoj brzini rukavca, za jednu vrstu maziva i konstantan tlak između kliznih površina, prikazuje Stribeckova krivulja (slika 2.9.).



Slika 2. 9. Stribeckova krivulja koja prikazuje karakteristiku promjene faktora trenja kao funkciju kutne brzine rukavca [1]

## 2.6. PRORAČUN RADIJALNIH KLIZNIH LEŽAJEVA S HIDRODINAMIČKIM PODMAZIVANJEM

U ovom dijelu će se prikazati način proračunavanja radijalnih kliznih ležajeva s hidrodinamičkim podmazivanjem, kako bi se dobio uvid u to koliko su ti klizni ležajevi opterećeni prilikom obavljanja svoje funkcije, o čemu sve treba voditi računa i na temelju toga kasnije odabrati odgovarajući materijal koji se može uspješno nositi sa svim tim zahtjevima na materijal kliznog ležaja.

Prilikom proračuna prvo treba definirati neke osnovne pojmove potrebne za proračun kao što su: apsolutna i relativna zračnost, ekscentricitet, relativni ekscentricitet, apsolutna i relativna debljina uljnog sloja i relativna širina ležaja. Također biti će prikazana raspodjela tlaka u nosivom uljnom sloju po obodu i u aksijalnom smjeru radijalnog kliznog ležaja, te srednji površinski pritisak i utjecaj promjene srednjeg pritiska na Stribeckovu krivulju. Za detaljnije objašnjenje i provedbu proračuna radijalnog kliznog ležaja s hidrodinamičkim podmazivanjem pogledati literaturu navedenu pod [1] i [2].

### 2.6.1. DEFINIRANJE POJMOVA POTREBNIH ZA PRORAČUN

1. APSOLUTNA ZRAČNOST  $Z$  – predstavlja razliku stvarnih mjera promjera ležajne blazinice  $D$  i promjera rukavca  $d$ :

$$Z = D - d \quad [\text{m}]. \quad (2.1)$$

2. RELATIVNA ZRAČNOST  $\Psi$  – definirana je omjerom apsolutne zračnosti i promjera blazinice:

$$\Psi = \frac{Z}{D} = \frac{D - d}{D}. \quad (2.2)$$

3. EKSCENTRICITET  $e$  – udaljenost između centra rukavca i centra ležaja:

$$e = R - r - h_0 = \frac{D - d}{2} - h_0 = \frac{Z}{2} - h_0 \quad [\text{m}]. \quad (2.3)$$



4. RELATIVNI EKSCENTRICITET  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{e}{Z/2} = \frac{2 \cdot e}{D-d} \quad (2.4)$$

5. RELATIVNA DEBLJINA ULJNOG SLOJA  $h_0$ :

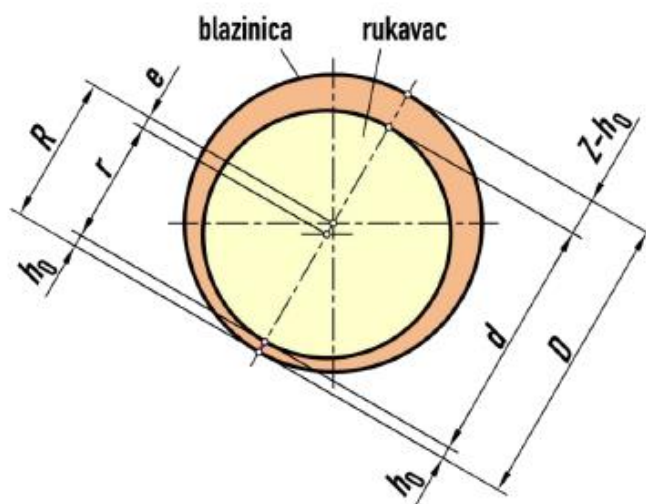
$$h_0 = R - r - e = \frac{D-d}{2} - e = \frac{Z}{2} - e \quad [\text{m}]. \quad (2.5)$$

Da bi došlo do hidrodinamičkog plivanja, odnosno tekućeg trenja, koje je objašnjeno u poglavlju 2.5., mora vrijediti  $h_0 \geq h_{lim}$ , pri čemu je  $h_{lim}$  empirička minimalna dopuštena debljina uljnog sloja pri kojoj dolazi do hidrodinamičkog plivanja, te se odabire ovisno o promjeru rukavca i brzini klizanja rukavca [1].

6. RELATIVNA DEBLJINA ULJNOG SLOJA  $\delta$ :

$$\delta = \frac{h_0}{Z/2} = \frac{2 \cdot h_0}{(D-d)} \quad (2.6)$$

Položaji navedenih veličina mogu se vidjeti na slici 2.10.

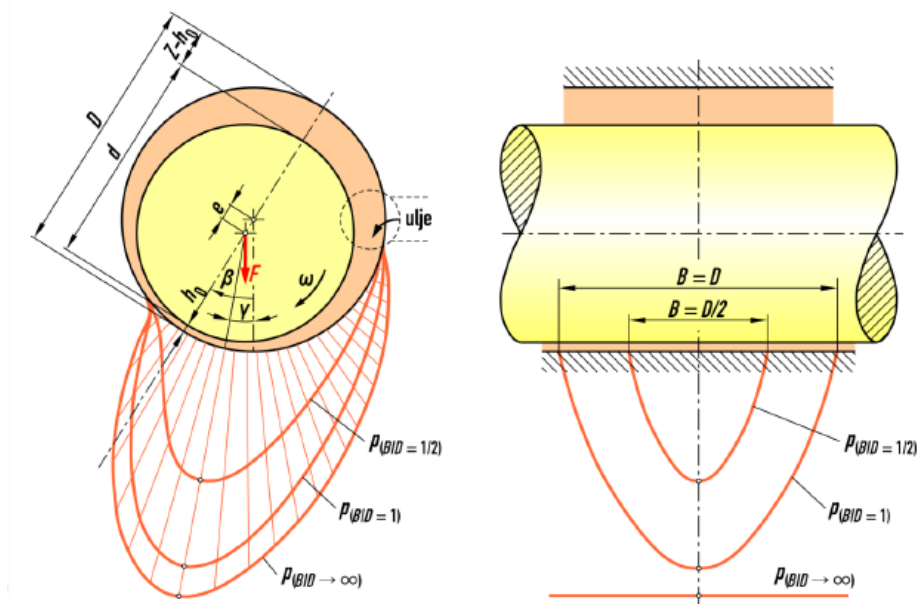


Slika 2. 10. Položaji definiranih pojmova potrebnih za proračun [1]

RELATIVNA ŠIRINA LEŽAJA  $\lambda$  – predstavlja omjer nazivne širine ležaja  $B$  i promjera blazinice ležaja  $D$ :

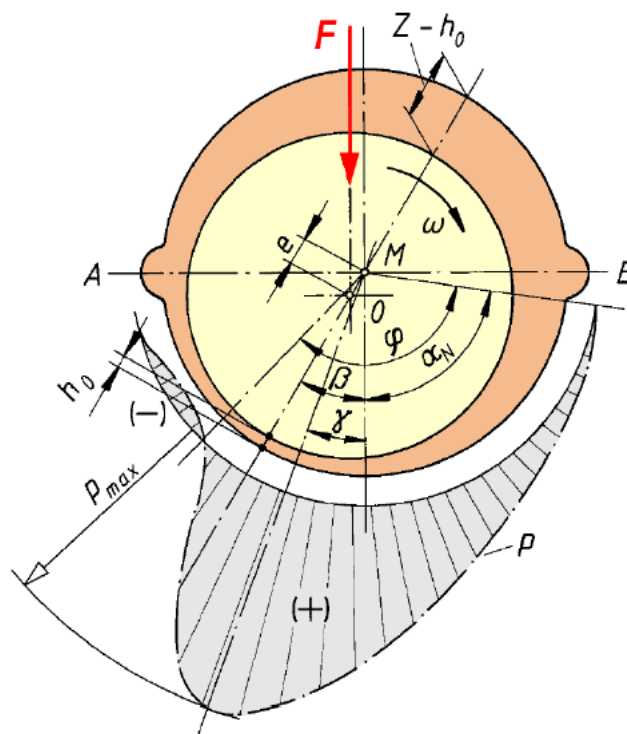
$$\lambda = \frac{B}{D}. \quad (2.7)$$

Porastom relativne širine ležaja  $\lambda$  raste najveći tlak  $p_{\max}$  koji se može postići u uljnom sloju, što se također može vidjeti na slici 2.11., te se gubi manje ulja u bočnom istjecanju. Nedostaci porasta su lošije odvođenje topline, samim time raste i temperatura ležaja, te raste opasnost od rubnih pritisaka uslijed nagninjanja vratila.



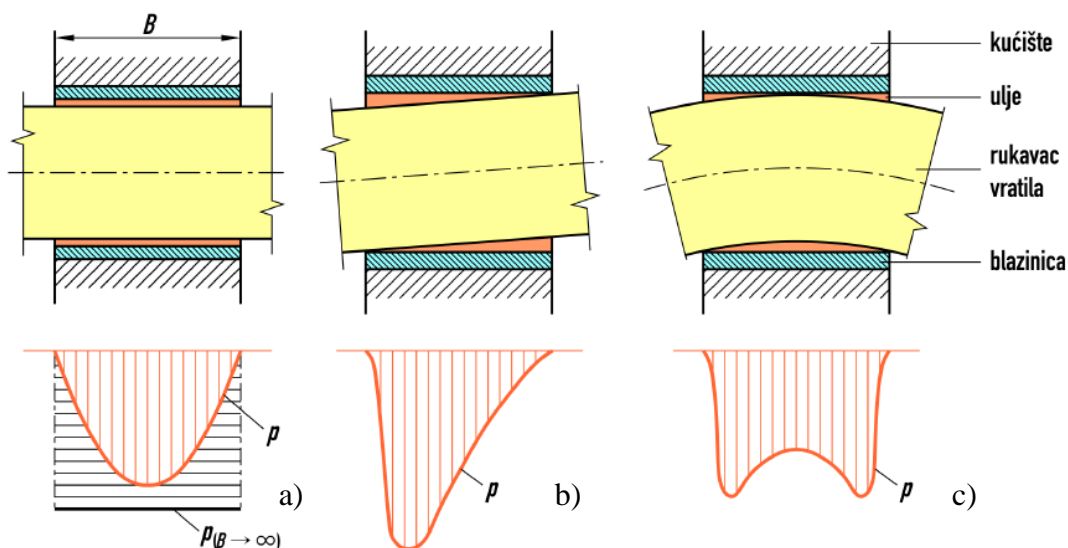
Slika 2. 11. Prikaz porasta tlaka koji se može postići u uljnom sloju [1]

Na slici 2.12. prikazano je na koji način djelovanje konstantnog opterećenja  $F$  uzrokuje raspodjelu tlaka  $p$  u nosivom uljnom sloju po obodu radijalnog kliznog ležaja.



**Slika 2. 12. Raspodjela tlaka  $p$  u nosivom uljnom sloju po obodu radijalnog kliznog ležaja pod djelovanjem konstantnog opterećenja  $F$  [1]**

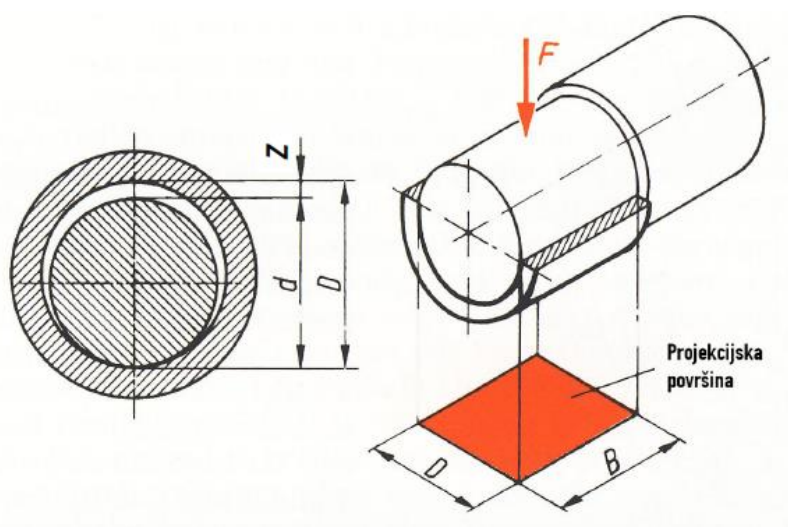
Osovine i vratila izložena su savijanju zbog djelovanja konstantnog opterećenja  $F$ . Duga i tanka vratila mogu biti dovoljno čvrsta, ali deformacijom mogu utjecati na rad i tako dovesti do odstupanja, ali također i do zagrijavanja u kliznim ležajevima zbog visokog rubnog pritiska, (slika 2.13.). To dovodi do velikog trošenja kliznih dijelova, pa čak i do zaribavanja. U takvim kritičnim slučajevima treba prema tome proračunati progib i kosi položaj rukavca. Kako bi se spriječile vibracije, koriste se klizni ležajevi s višestrukim kliznim površinama, na primjer kod preciznih alatnih strojeva. Blazinice s višestrukim kliznim površinama omogućavaju točan centriran hod rukavca vratila i stvaraju na svim klinastim procijepima nosivi mazivi sloj. Zračnost u ležaju je u tom slučaju mala, te odgovara debljini uljnog sloja  $h_0$ . Zato su klizne površine oblikovane klinasto [2].



Slika 2. 13. Raspodjela tlaka  $p$  u nosivom uljnom sloju u aksijalnom smjeru: a) za konačnu i za beskonačnu širinu ležaja  $B$ , b) za nagnuto vratilo i c) za savijeno vratilo [1]

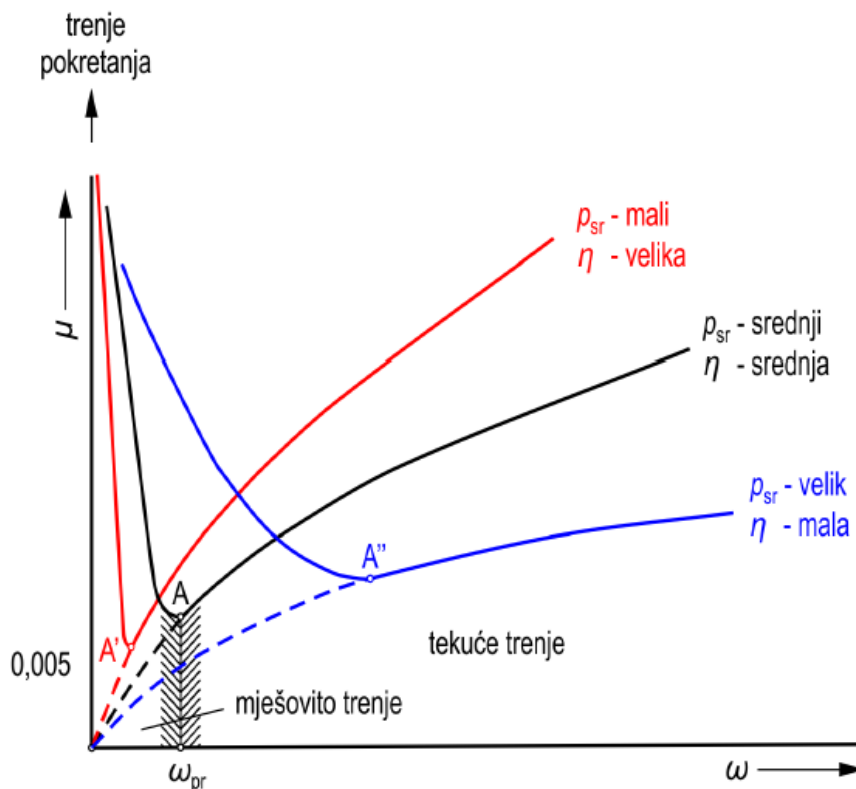
SREDNJI POVRŠINSKI PRITISAK U LEŽAJU  $p_m$  – kod kontrole nosivosti kliznih ležaja računa se sa srednjim površinskim tlakom  $p_m$  kao pritiskom sile  $F$  na projekcijsku površinu nosivog rukavca  $B \cdot D$  i mora biti manji od  $p_{m, dop}$ .

$$p_m = \frac{F}{B \cdot D} = \frac{F}{d^2 \cdot \lambda} \leq p_{m, dop} \text{ [Pa]}. \quad (2.8)$$



Slika 2. 14. Opterećena projekcijska površina ležaja [1]

Potrebna je veća brzina vrtnje ako se opterećenje povećava kako bi nastao odgovarajući tlak u ulju potreban za ostvarivanje tekućeg trenja zbog čega se prijelazna točka A pomiče u desno. Pri manjim brzinama vrtnje koriste se maziva veće viskoznosti, a u slučaju većih brzina upotrebljavaju se maziva manje viskoznosti. U području tekućeg trenja, pri istoj kutnoj brzini  $\omega$ , mazivo veće viskoznosti ima veći faktor trenja od maziva s manjom viskoznošću. Taj utjecaj može se vidjeti na slici 2.15.

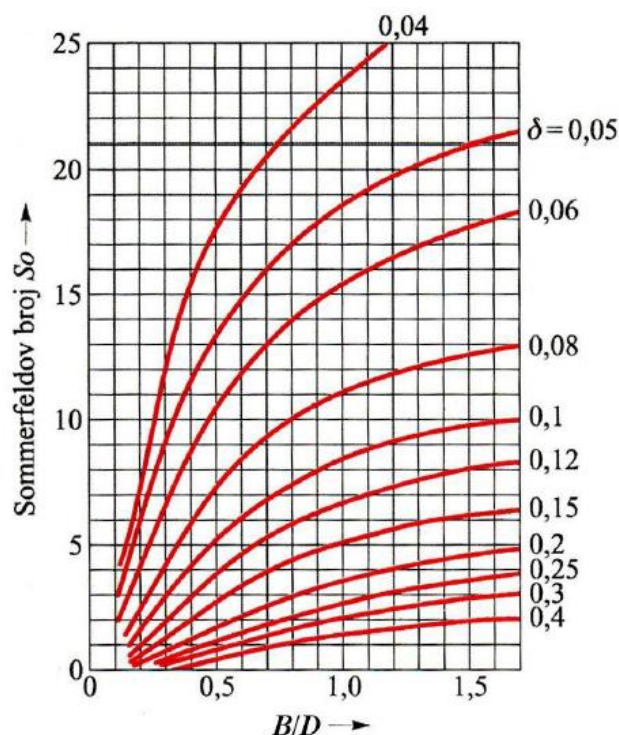


**Slika 2. 15. Utjecaj promjene srednjeg pritiska  $p_{sr}$  na Stribeckovu krivulju [1]**

Kako bi mogli dati formule za izračunavanje faktora tekućeg trenja u brzohodnom području i u području teškog opterećenja rada kliznih ležajeva potrebna nam je bezdimenzijska veličina mjerodavna za radijalno opterećene ležajeve koja se naziva Sommerfeldov broj  $S_0$ , a definiran je sljedećim omjerom:

$$s_0 = \frac{p_m \cdot \Psi^2}{\eta \cdot \omega} \quad (2.9)$$

Karakteristična veličina nosivih ležaja je konstrukcijska veličina  $B/D$  (projekcijska površina), koja općenito iznosi od 0,6 do 1,5. Zbog opasnosti od rubnih tlakova upotrebljavaju se kratki klizni ležajevi, ali ako je  $B$  jako mali tada mazivo ili ulje istječe bočno iz procjepa, a da se ne stvori potreban tlak. Upravo je zbog toga za projektiranje radijalnih kliznih ležajeva izračunata ovisnost Sommerfeldovog broja  $S_0$  o različitim omjerima karakteristične veličine  $B/D$  za različite relativne debljine uljnog sloja  $\delta$  (slika 2.16.). Jako veliki  $S_0$  upućuje na to da je relativna debljina uljnog sloja  $\delta$ , a time i apsolutna debljina uljnog sloja  $h_0$  premalena.



**Slika 2. 16. Relativna debljina uljnog sloja ovisno o Sommerfeldovom broju  $S_0$  i karakteristici ležaja  $B/D$  [1]**

Sada možemo definirati izraze za faktor tekućeg trenja u brzohodnom području pri Sommerfeldovom broju  $S_0 < 1$  koji iznosi:

$$\mu \approx \frac{3 \cdot \Psi}{S_0} . \quad (2.10)$$

U području teškog opterećenja pri Sommerfeldovom broju  $S_0 > 1$  faktor tekućeg trenja približno iznosi:

$$\mu \approx \frac{3 \cdot \Psi}{\sqrt{S_0}}. \quad (2.11)$$

Neke vrijednosti za koeficijente trenja prema brzini klizanja kod kliznih ležajeva, uz različite vrste podmazivanja, te za uobičajena maziva navedena su u tablici 2.1.

**Tablica 2. 1. Iskustvene vrijednosti za koeficijent trenja u kliznim ležajevima i preporučljivo mazivo [2]**

Vrste ležaja i podmazivanje		Materijal ležaja	Srednja vrijednost od $\mu$		
			Trenje pri zaletu	Mješovito trenje	Tekuće trenje
Poprečni ležaj	Mast	GG, G-SnBz, Rg	0,12	0,05...0,1	-
	Ulje	GG, G-SnBz, Rg	0,14	0,02...0,1	0,003...0,008
	Ulje	LgPbSn, LgSn	0,24	-	0,002...0,003
	Ulje	Umjetna smola za prešanje	0,14	0,01...0,03	0,003...0,006
	Ulje	Materijal za sinteriranje	0,17	-	0,002...0,014
	Suho	Višeslojna umjetna smola	Pri brzini klizanja $< 0,1$ m/s: 0,05...0,1 0,2...6 m/s: 0,1...0,16		

## 2.7. ZAHTJEVI NA MATERIJAL KLIZNIH LEŽAJEVA

Kod odabira materijala za klizne ležajeve potrebno je voditi računa o materijalu blazinice ležaja, materijalu rukavca, ali također i o materijalu maziva. Ta tri materijala zajedno tvore tribološki sustav čija svojstva su izrazito bitna za ispravan rad kliznih ležajeva bez obzira o kojoj se vrsti trenja radi.

Na temelju svih tih podataka opisanih u ovom poglavlju Tribosustav kliznog ležaja, opisu cijelog tribosustava, djelovanju sila na klizni ležaj, način proračuna faktora trenja, te djelovanje kontaktnih pritisaka vidimo što se sa tim tribosustavom događa na površini, a što ispod površine i iz svega toga slijede zahtjevi na materijal kliznih ležajeva.

Od temeljnih zahtjeva najvažnija je otpornost na trošenje, posebno je naglasak kod kliznih ležajeva na otpornost na adheziju ukoliko klizni ležaj radi u uvjetima suhog trenja. Ostali zahtjevi prema DIN 50282 su sljedeći [2]:

1. Prilagodljivost. Ležajni materijal se pod opterećenjem treba moći elastično, a u nekim slučajevima i plastično prilagođavati promjenama oblika.
2. Tlačna čvrstoća. Ležajni materijal treba trajno podnositi tlačno opterećenje.
3. Kompatibilnost s materijalom rukavca.
4. Neosjetljivost na zaribavanje. Ležajni materijal mora imati svojstvo da se na visokim temperaturama ne zavaruje s površinom nalijeganja rukavca.
5. Mala sklonost stvaranju brazda. Struktura materijala mora biti takva da se na kliznim površinama pod opterećenjem i deformacijom ne stvaraju brazde, koje mogu dovesti do brzog trošenja.
6. Sposobnost uhodavanja. Ležajni materijal se treba lako prilagođavati odstupanjima geometrijskog oblika zbog opterećenja.
7. Otpornost na trošenje ukoliko dođe do odvajanja sitnih čestica.
8. Sposobnost klizanja pri nepovoljnom podmazivanju. Materijal mora omogućiti da se proces klizanja održi još neko vrijeme u slučaju da nastupe nepredviđene nepovoljne okolnosti, kod na primjer prekida dovoda maziva. Tada se ne smije pojaviti zaribavanje.
9. Sposobnost jednolikog raspoređivanja maziva u tribo sustavu.
10. Toplinska vodljivost. Materijal treba dobro odvoditi toplinu koja je nastala zbog trenja.

Radi bolje preglednosti i lakšeg snalaženja svojstva tribološkog sustava se dijele na:

#### OPĆENITA SVOJSTVA:

- odgovarajuća dinamička čvrstoća,
- otpornost na dodirni pritisak,
- sposobnost odvođenja topline,
- dobro vezanje materijala za podlogu,
- što ravnomjernije rastezanje pri povišenim temperaturama i da ne dolazi do bubrenja.



**ANTIFRIKCIJSKA SVOJSTVA:**

- međusobno „uglašavanje“ materijala rukavca i osovine,
- kod rada na suho da ne dolazi do zaribavanja,
- prilagodljivost ležaja elastičnim i plastičnim deformacijama,
- otpornost na trošenje,
- otpornost na nagrizanje kliznih površina,
- otpornost razrađivanja ležaja,
- otpornost na utiskivanje tvrdih odvojenih čestica u površinu.

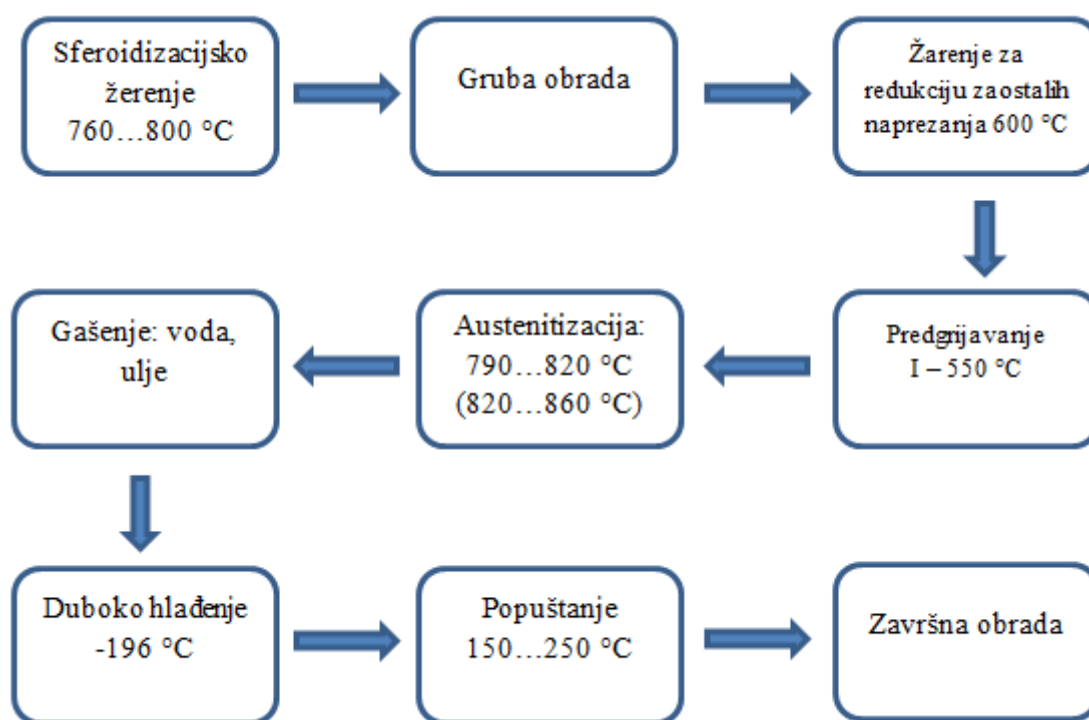
### 3. MODIFICIRANJE I PREVLAČENJE ČELIKA DIN 100Cr6

#### 3.1. ČELIK DIN 100Cr6

Čelik DIN 100Cr6 pripada podskupini niskolegiranih Cr čelika, skupine niskolegiranih alatnih čelika za hladni rad. Ti čelici sadrže od 1 do 1,5 %C i od 0,5 do 1,5 %Cr, a služe za izradu alata i dijelova kotrljajućih ležajeva zbog svoje otpornosti na trošenje i visoke specifične pritiske i do 500 MPa. Dakle mogu se koristiti i u alatnoj i u konstrukcijskoj primjeni. Nadeutektoidnog su sastava, pa nakon kaljenja postižu mikrostrukturu: martenzit (M) +  $(\text{Fe,Cr})_3\text{C}$  + Az. Zaostali austenit je nepoželjan u radu tlačno opterećenih alata i ležaja, pa se prije popuštanja provodi duboko hlađenje (pri  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) kako bi se eliminirao.

##### 3.1.1. TOPLINSKA OBRADA ČELIKA DIN 100Cr6

Koraci postupka čelika DIN 100Cr6 prema [6] prikazani su na slici 3.1.



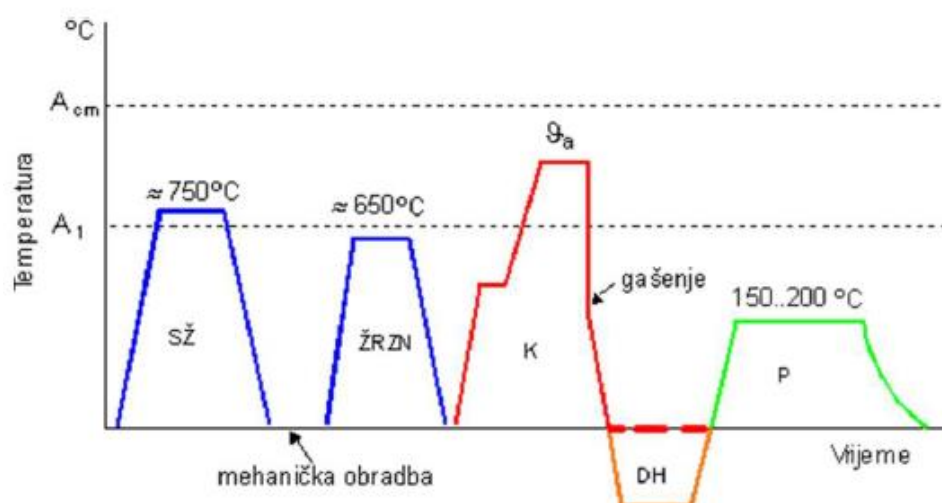
Slika 3. 1. Koraci postupka obrade čelika DIN 100Cr6 [6]

Optimalna struktura za obradu ovih alatnih čelika obradom odvajanjem čestica je sitni sferoidit, a to je ujedno i optimalna polazna struktura za kaljenje tog čelika, te zbog toga u takvom stanju treba tražiti čelik od dobavljača. Ukoliko se izvođenje žarenja izvodi samostalno treba paziti na optimalne temperature i brzinu hlađenja kako bi se dobila odgovarajuća i najbolja struktura.

Kaljenje se izvodi s temperature između  $A_1$  i  $A_{cm}$ . Obično su čelici ove grupe kaljivi u vodi, no ukoliko su dimenzije ispod  $\varnothing 25$  mm mogu se kaliti i u ulju, ali tada temperatura treba biti 50 K viša od temperature propisane za gašenje u vodi. Osjetljivi su i na razugljičenje, pa ih zbog toga treba zaštititi. Pri gašenju su dimenzijski stabilni.

Također provodi se i popuštanje. Pojava nepovratne niskotemperaturne krhkosti popuštanja najviše dolazi do izražaja pri oko 260 °C (Krhkost 300). Zaostali austenit se popuštanjem eliminira samo djelomično, pa se prije popuštanja provodi duboko hlađenje (najbolje pri -196 °C).

Cijeli postupak uobičajene toplinske obrade niskolegiranih Cr čelika, a samim time i čelika DIN 100Cr6 prikazan je na slici 3.2.



**Slika 3. 2. Postupak toplinske obrade čelika DIN 100Cr6 [4]**

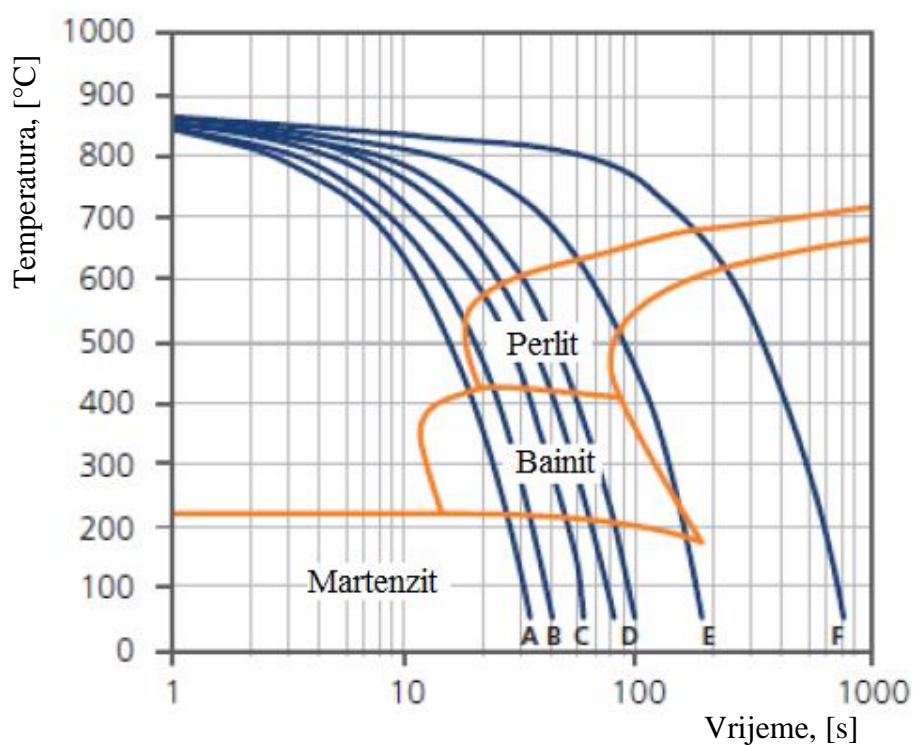
Naravno, tijekom toplinske obrade tog čelika, kao i sam sastav varira ovisno od čeličane do čeličane koja ga proizvodi. Tako se razlikuju i TTT dijagrami, preporučene temperature austenitizacije i popuštanja, dijagram popuštanja, ali sve u intervalima koji su preporučeni za taj čelik. U nastavku na primjerima različitih čeličana to se može i vidjeti. Za ostale podatke o čeliku od ovih proizvođača pogledati literaturu [7] i [8].

**Tablica 3. 1. Kemijski sastav čelika DIN 100Cr6 proizvođača – Ovako [7]**

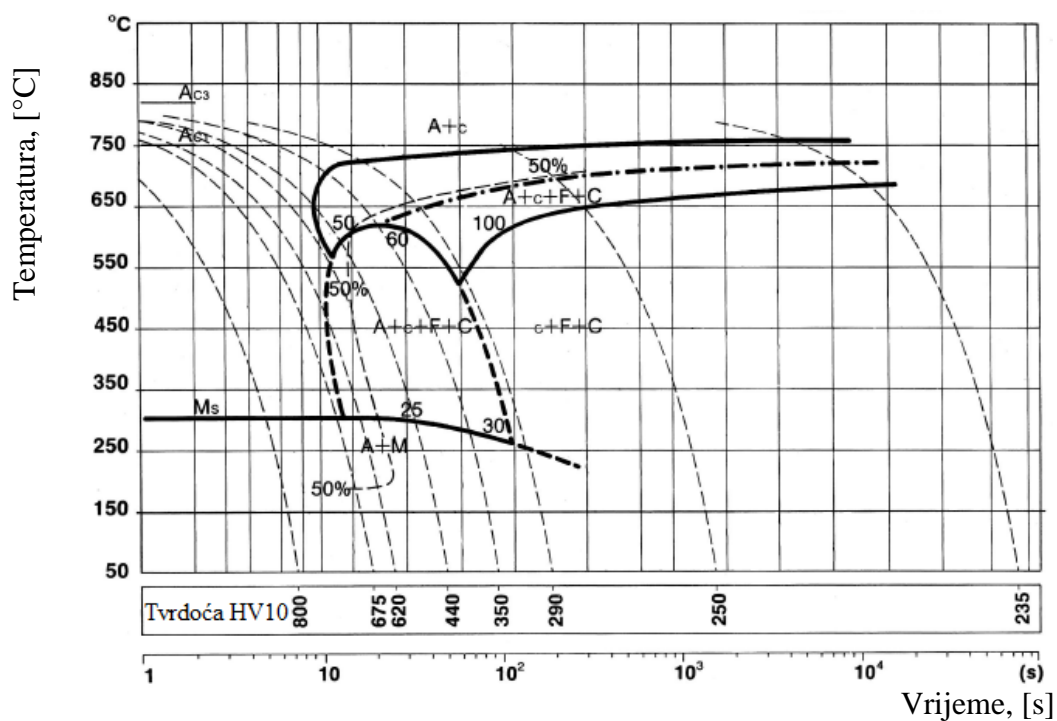
Varijanta čelika	Udio elemenata	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Ni%	Mn%
803P	Min	0,98	0,20	0,25	-	0,003	1,35	-	-
	Max	1,05	0,35	0,40	0,020	0,008	1,60	0,20	0,06

**Tablica 3. 2. Kemijski sastav čelika DIN 100Cr6 proizvođača – IMS [8]**

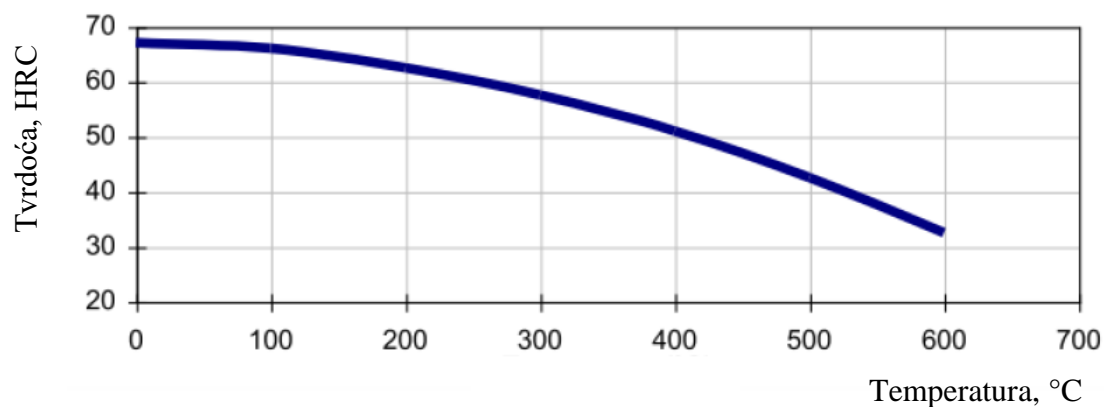
Udio elemenata	C%	Si%	Mn%	Cr%	Ni%	Mo%	Ostali
Min	0,95	0,15	0,25	1,40	-	-	-
Max	1,10	0,35	0,45	1,60	-	-	-



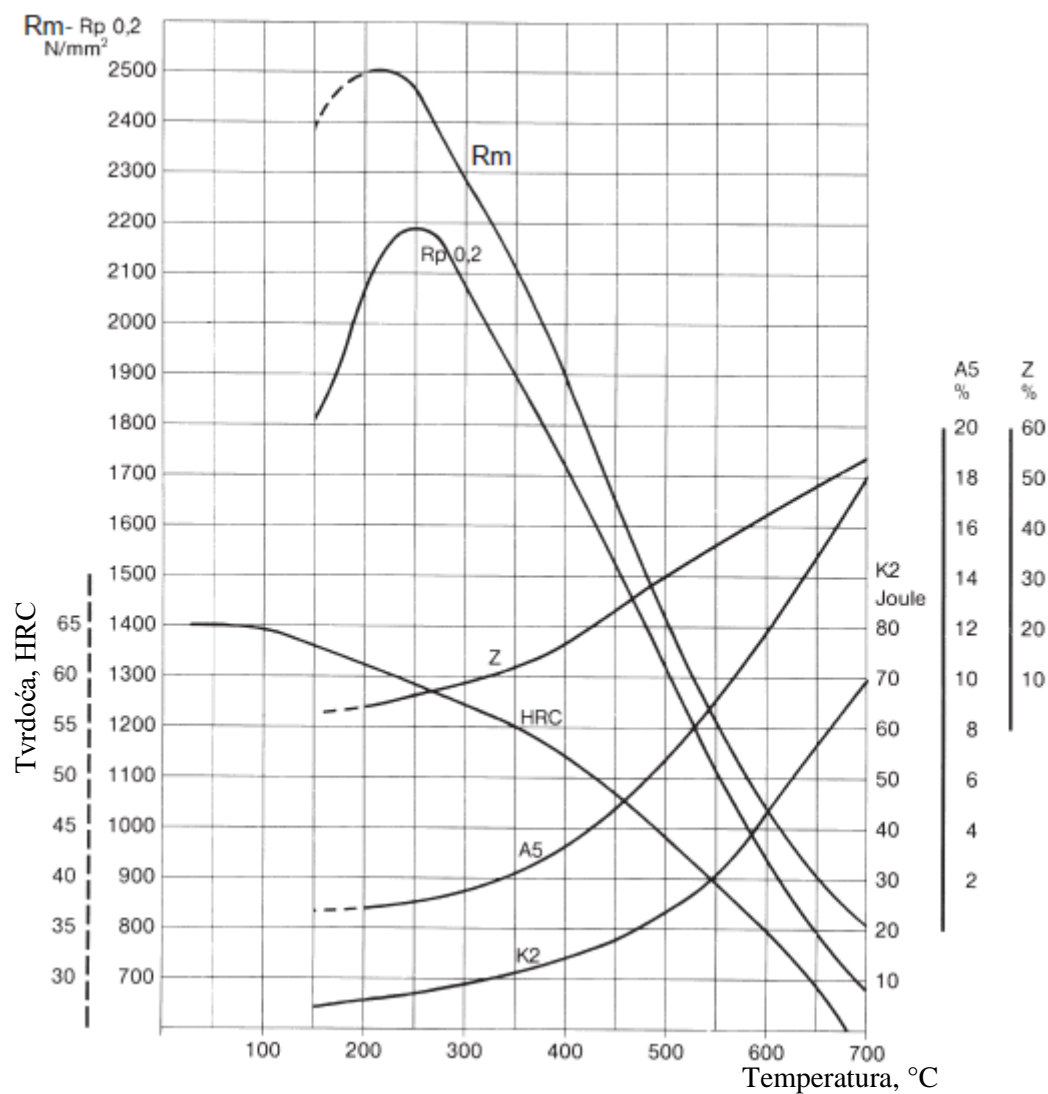
Slika 3. 3. Kontinuirani TTT dijagram čelika DIN 100 Cr6 proizvođača – Ovako ( $\vartheta_A=860\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 10 minuta) [7]



Slika 3. 4. Kontinuirani TTT dijagram čelika DIN 100 Cr6 proizvođača – IMS ( $\vartheta_A=850\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) [8]



Slika 3. 5. Dijagram popuštanja čelika DIN 100Cr6 proizvođača – Ovako ( $\vartheta_A=840$  °C, hlađen u ulju i popušten 1h) [7]



Slika 3. 6. Dijagram popuštanja čelika DIN 100Cr6 proizvođača – IMS ( $\vartheta_A=850$  °C, hlađen u ulju i popušten 2h) [8]

### 3.2. OPISI POSTUPKA MODIFICIRANJA I PREVLAČENJA PRSTENA KLIZNOG LEŽAJA

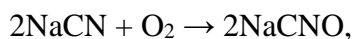
Prilikom odabira postupka modificiranja i prevlačenja prstena kliznog ležaja koji je korišten u ovome radu trebalo je voditi računa o tome da se čelik DIN 100Cr6 isporučuje u kaljenom i popuštenom stanju i da ta temperatura popuštanja određuje primjenjivost postupka modificiranja i prevlačenja.

Mogući postupci koji se mogu provesti kod ovog prstena su kada govorimo o nitriranju, nitrokarburiranje postupkom TENIFER, plinsko nitriranje, nitriranje u plazmi i sulfonitriranje. Kada govorimo o prevlačenju moguće je prevlačenje PVD i PACVD.

#### 3.2.1. NITROKARBURIRANJE U SOLNOJ KUPCI TENIFER

Prema [9], nitrokarburiranje je postupak termokemijske obrade kojim se postiže obogaćivanje površinskih slojeva predmeta dušikom i ugljikom, a stvara se zona spojeva. Ispod zone spojeva nalazi se difuzijska zona obogaćena dušikom, ali ne toliko da bi se stvorila neprekinuta zona spojeva.

Nitrokarburiranje u solnim kupkama izvodi se uranjanjem i držanjem predmeta u solima koje sadrže cijanide (NaCN) uz dodatak kalijeva cijanata (KCNO). Za vrijeme procesa nitrokarburiranja u solnoj kupki oksidacijom se sol za nitriranje raspada:



a nastali natrijev, odnosno kalijev cijanat, daljnjom oksidacijom stvara:



Kako se iz gornjih izraza vidi, osim difuzije dušika, istodobno putem ugljičnog monoksida u površinu predmeta prodire i ugljik.

Postupkom ne dolazi da znatnog povećanja tvrdoće, ali se postiže izvanredna otpornost na trošenje. Provodi se u pećima s loncem, a karakteristike postupka prikazane su u tablici 3.1.

**Tablica 3. 3. Karakteristike postupka nitrokarburiranja u solnoj kupci TENIFER [10]**

Temperatura, °C	Trajanje, h	Difuzija elemenata	Medij
570...580	1...3 (10)	N, C	Smjesa CN, CNO

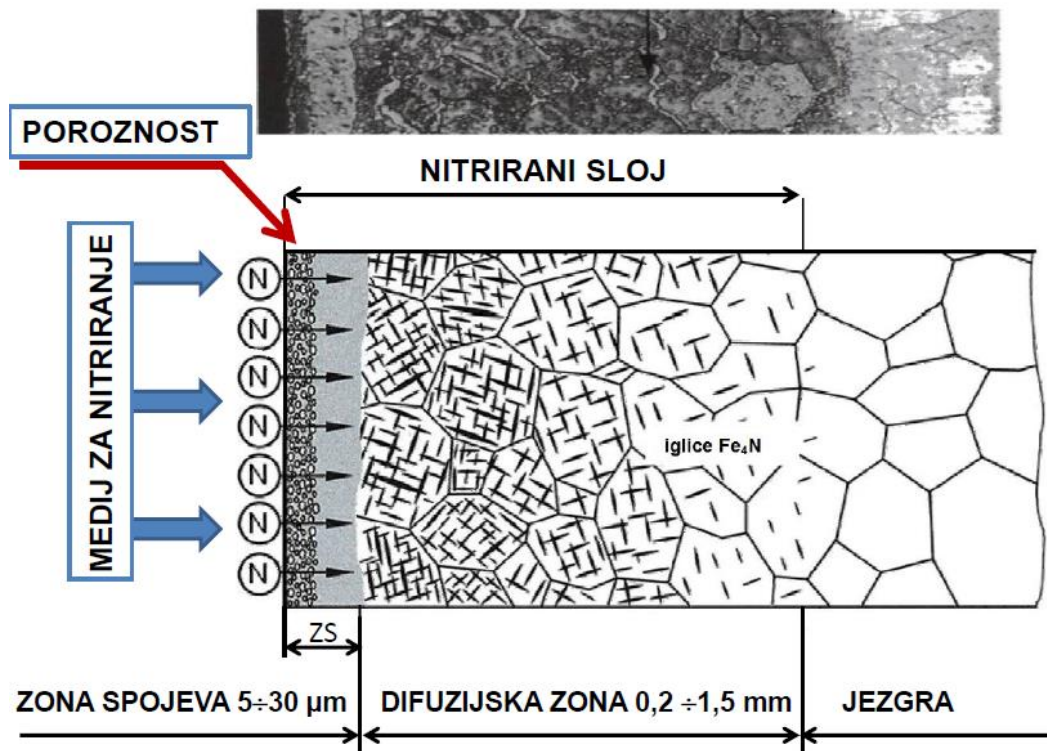
Nitrokarburiranje je čest postupak u primjeni zbog kratkoće trajanja postupka, te je primjenjiv kod svih vrsta čelika i željeznih sinteriranih materijala.

Svojstva nastalog sloja su:

- bolja svojstva klizanja,
- manja sklonost zaribavanju,
- veća otpornost na trošenje, posebno na otpornost na adheziju,
- veća duktilnost, dinamička čvrstoća, otpornost koroziji,
- veća tvrdoća na povišenim temperaturama.

### 3.2.2. NITRIRANJE U PLAZMI

Nitriranje je toplinsko-kemijska obrada koja se temelji na difuziji dušika u površinu obratka. Obrada se sastoji od izlaganja obratka na temperaturu između 500 i 600 °C u sredstvu koje otpušta dušik. Sredstva koja se koriste za nitriranje mogu biti: čvrsta, plinovita, tekuća i ionizirane plinske atmosfere. Izgled nitriranog sloja prikazan je na slici 3.7.



Slika 3. 7. Izgled nitiranog sloja [10]



Ovisno o izboru medija za nitiranje razlikuju se i karakteristike postupka. Kako je u ovom radu korišteno nitiranje u plazmi karakteristike su prikazane u tablici 3.4.

**Tablica 3. 4. Karakteristike postupka nitiranja u plazmi [10]**

Temperatura, °C	Trajanje, h	Difuzija elemenata	Medij
350...660	Nekoliko minuta do više sati	N, (H)	N <sub>2</sub> ili NH <sub>3</sub> plin

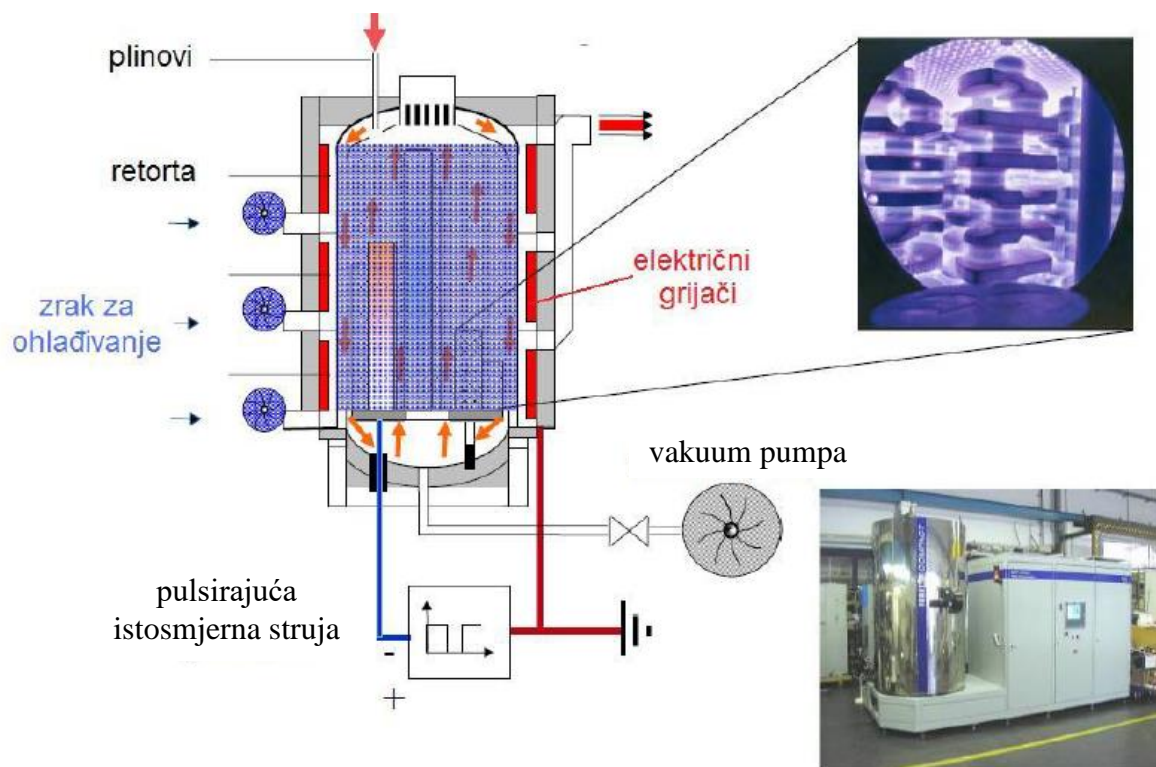
Prednosti nitiranja u plazmi:

1. Široke mogućnosti intervala parametara (350...660 °C, najčešće 500..550 °C), kraće vrijeme – ekonomičnost.
2. Moguće je postići: – zonu spojeva s  $\varepsilon$  nitridima, bez pora ili sa slabom poroznošću,
  - smjesa  $\gamma'$  +  $\varepsilon$  nitrida,
  - zonu spojeva s  $\gamma'$  nitridima (vrlo tvrda, ali i relativno žilava),
  - nitirani sloj bez zone spojeva (samo difuzijska zona), slika 3.8.
3. Ekološki je prihvatljiv postupak (neotrovan za okoliš).
4. Praktički se mogu nitirati svi čelici i Fe lijevovi.
5. Postupak se može lako automatizirati i uklopiti u proizvodnu liniju.
6. Prikladan za sve dijelove i velikih i malih masa.
7. Moguće je parcijalno nitiranje.



**Slika 3. 8. Mikrostruktura zone spojeva koja se može postići nitiranjem u plazmi [10]**

Uređaj za nitriranje u plazmi kao i svi njegovi dijelovi mogu se vidjeti na slici 3.9.



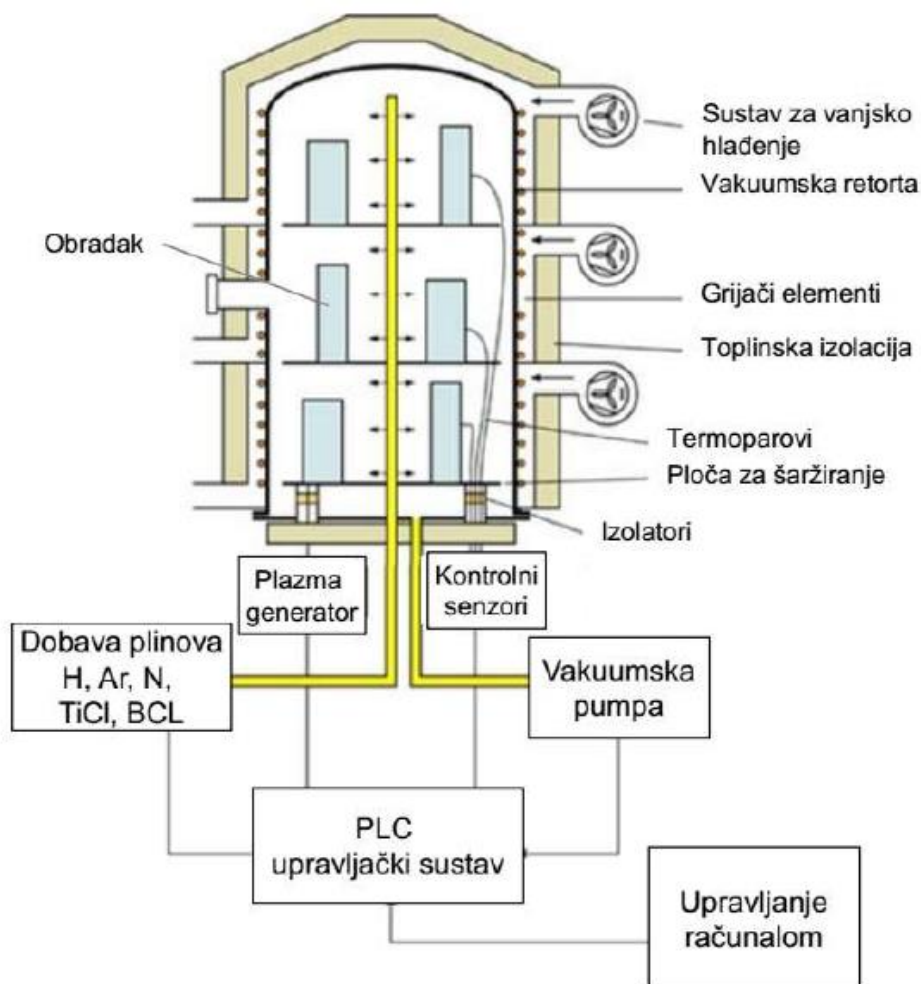
Slika 3. 9. Uređaj za nitriranje u plazmi [10]

### 3.2.3. PREVLAČENJE PREVLAKOM $TiN/TiCN$ POSTUPKOM PACVD

Svrha prevlačenja je zaštita alata i konstrukcijskih dijelova od trošenja, povišenjem tvrdoće, sprječavanjem izravnog kontakta alata i materijala, smanjenje faktora trenja, bolja kemijska postojanost, te zaštita od korozije i oksidacije. Samim time manja je potrošnja tekućine za obradu odvajanjem čestica, sredstva za hlađenje i odvajanje i maziva. Ponekad se dijelovi prevlače samo kako bi dobili dekorativnu svrhu. Upravo zbog toga razvili su se novi postupci sa kojima je sve ovo moguće.

PACVD (eng. plasma assisted chemical vapour deposition) je plazmom potpomognuto kemijsko prevlačenje iz parne faze. Taj proces uz klasično CVD koje se sastoji od prijenosa plinova i parovitih reaktanata do obratka (uz adsorpciju reaktanata na njegovoj površini), te kemijske reakcije adsorbiranih komponenata u kojima nastaje tvrdi površinski sloj, još koristi i plazmu. Svrha plazme je ionizacija i disocijacija plinova, te zagrijavanje osnovnog materijala i aktivacija kemijskih procesa. Ovim uređajem omogućuje se proizvodnja vrlo tankih jednoslojnih, višeslojnih, čak i nanodimenzioniranih slojeva kao što su:  $TiN$ ,  $TiCN$ ,

TiBN, TiB<sub>2</sub>. Osim toga moguće je provoditi najmoderniji postupak nitriranja u plazmi. Svi dijelovi se mogu vidjeti na slici 3.10. U uređaj se stavljaju šaržirani dijelovi i proces može započeti.



Slika 3. 10. Shematski prikaz PACVD uređaja [11]

Neke od prednosti PACVD postupka i zašto se koristiti u odnosu na druge postupke su:

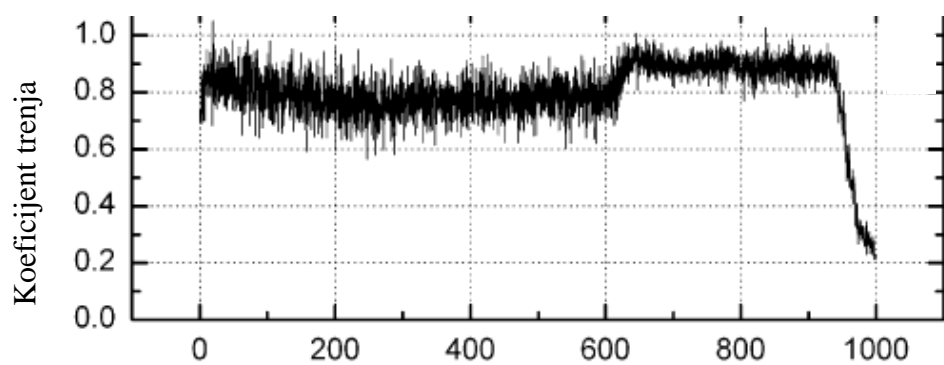
- niska temperatura procesa 470...580 °C,
- nije potrebno kaljenje poslije prevlačenja,
- nije potrebno pomicanje šarže,
- vrlo glatka kvaliteta površine obratka nakon procesa,
- moguće je izrađivanje dupleks prevlaka,
- troškovi održavanja i procesa su niski.

Jedan takav uređaj instaliran je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, proizvođača Rubig, (slika 3.11.)

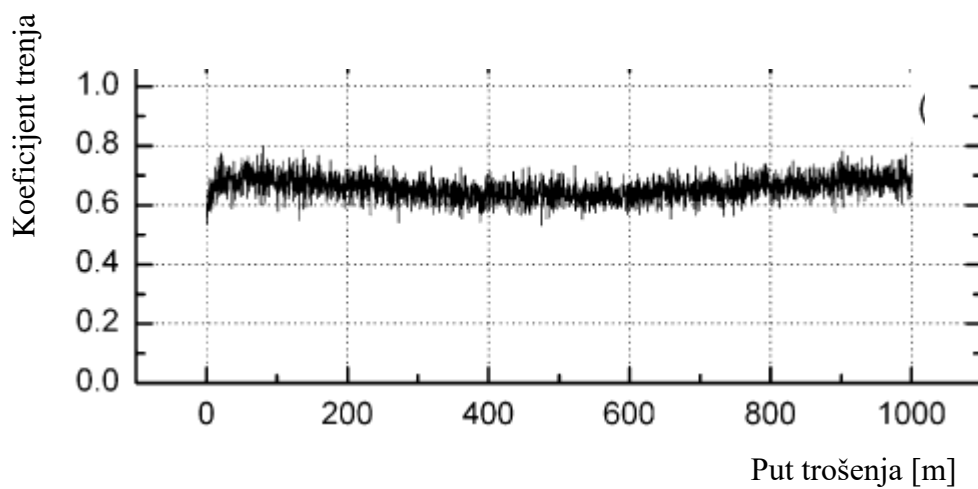


**Slika 3. 11. PACVD uređaj Rubig 70/90 instaliran na FSB-u**

Kombinacija prevlaka TiN/TiCN na prstenima kliznih ležajeva i ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje do sada se još nije primjenjivalo, te je zbog toga naglasak na tu prevlaku u ovome radu. Rezultati prijašnjih ispitivanja prevlake samo TiN korištenjem austenitnog nehrđajućeg čelika kao kontrapara može se vidjeti na slici 3.12.



a) Put trošenja [m]



b)

**Slika 3. 12. Ovisnost faktora trenja o putu trošenja TiN prevlake i austenitnog nehrđajućeg čelika kao kontrapara, primjenom metode Blok na prstenu: a) korištenjem normalne sile od 2 N, b) korištenjem normalne sile od 10 N [13]**

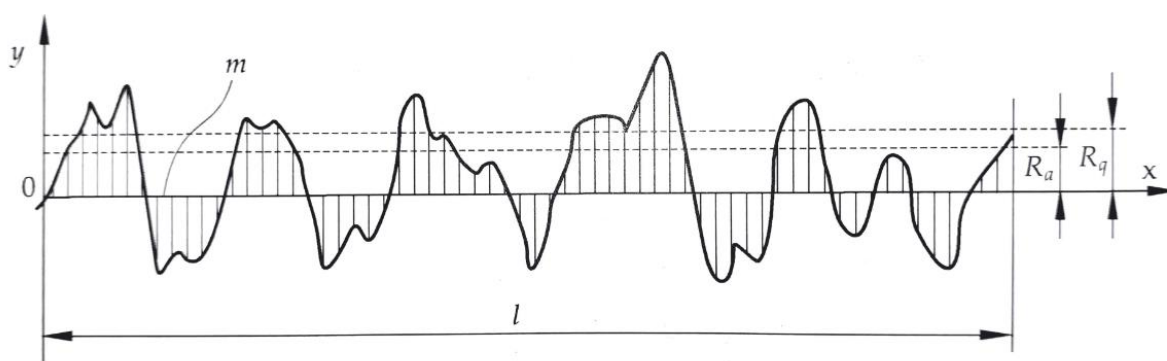
## 4. METODE ISPITIVANJA

U ovom radu su se na toplinski obrađenim uzorcima prstena kliznog ležaja od čelika DIN 100Cr6 provele metode ispitivanja hrapavosti površine, mikrotvrdoće površine i otpornosti na adhezijsko trošenje.

### 4.1. HRAPAVOST POVRŠINE

Izgled površine, najčešće se prikazuje u obliku profila hrapavosti  $p$  i promatra se na referentnoj duljini  $l$ , a to je dogovorena duljina profila izabranog za određivanje hrapavosti. U praksi se geometrija površina izražava numeričkim podacima, a osnovni parametri oblika površina su:

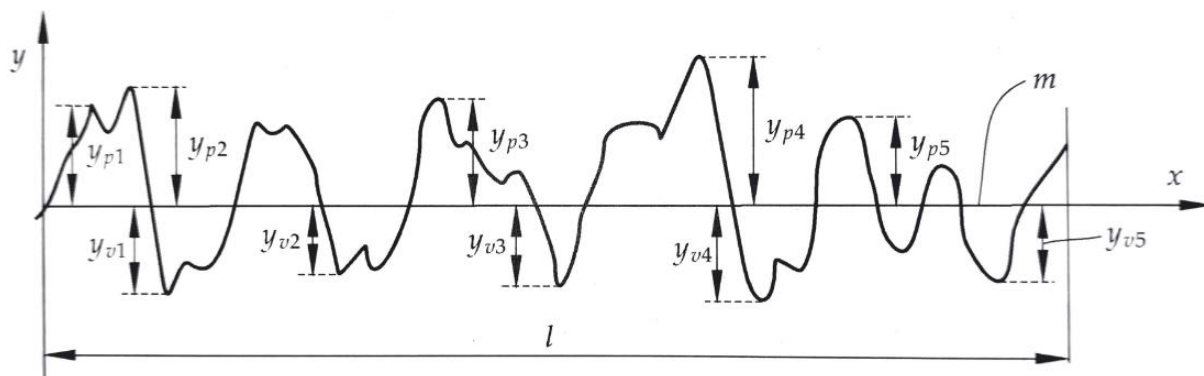
- **Srednja linija profila,  $m$**  – linija koja siječe profil  $p$  tako da je, u granicama referentne duljine  $l$ , zbroj kvadrata udaljenosti  $y$  svih točaka profila od srednje linije jednak minimumu (slika 4.1.).
- **Srednje aritmetičko odstupanje profila,  $R_a$**  – srednja aritmetička vrijednost apsolutnih vrijednosti profila  $y$  u granicama referentne duljine  $l$  (slika 4.1.).
- **Srednje kvadratno odstupanje profila,  $R_q$**  – srednja kvadratna vrijednost profila  $p$  u granicama referentne duljine  $l$ , (slika 4.1.).



Slika 4. 1. Referentna duljina profila  $l$ , srednje aritmetičko odstupanje profila  $R_a$  i srednje kvadratno odstupanje profila  $R_q$  [3]

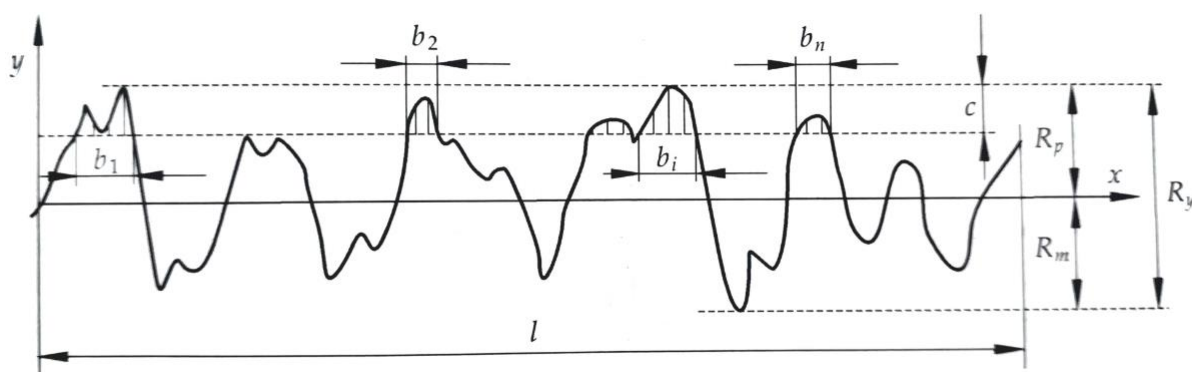


- **Prosječna visina neravnina,  $R_z$**  (mjerena u deset točaka) – srednja vrijednost apsolutnih vrijednosti visine 5 najviših izbočina i dubine 5 najdubljih udubina u granicama referentne duljine  $l$  (slika 4.2.).



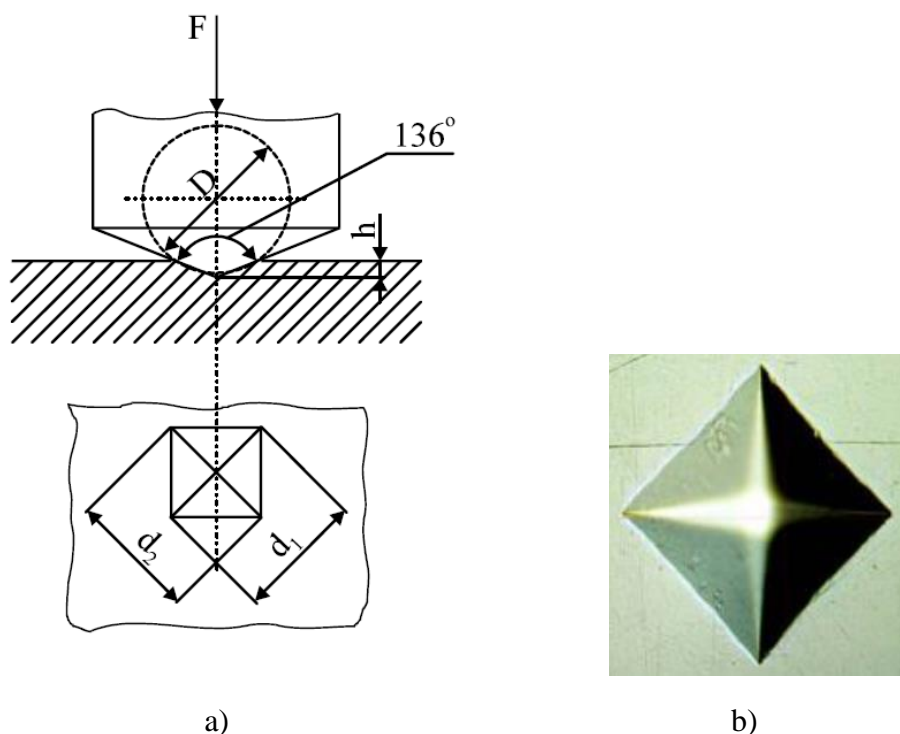
Slika 4. 2. Prosječna visina neravnina [3]

- **Najveća visina profila,  $R_y$ , ( $R_{max}$ )** – razmak između dvaju pravaca, paralelnih sa srednjom linijom profila  $m$  koji dotiče, u granicama referentne duljine  $l$ , najviše odnosno najniže točke profila  $p$  (slika 4.3.).
- **Najveća visina izbočine profila,  $R_p$**  (slika 4.3.).
- **Najveća dubina izbočine profila,  $R_m$**  (slika 4.3.) [3].

Slika 4. 3. Najveća visina profila  $R$ , najveća visina izbočine profila  $R_p$  i najveća dubina izbočine profila  $R_m$  [3]

## 4.2. MIKROTVRDOĆA

Ispitivanje mikrotvrdoće provelo se metodom Vickers. Osnovni princip metode je mjerenje dijagonala baze otisnuća kvadrata tj. otiska što ga indenter opterećen silom, koja je manja od 1,96 N, načini u materijalu, (slika 4.4.). Materijal od kojega se izrađuje indenter je dijamant, a oblik mu je četverostrana piramida s kutom između nasuprotnih strana od  $136^\circ$ . Takva geometrija nije odabrana slučajno, jer se baš s tim kutom dobivaju vrijednosti tvrdoće neovisne o primijenjenoj sili, pa se tvrdoća mekih i tvrdih materijala može mjeriti primjenom iste sile. Isto tako se tvrdoća istog materijala može mjeriti s različitim opterećenjima.



**Slika 4. 4. Ispitivanje mikrotvrdoće metodom Vickers: a) princip ispitivanja, b) izgled indentora [14]**

## 4.3. METODA BLOK NA PRSTENU

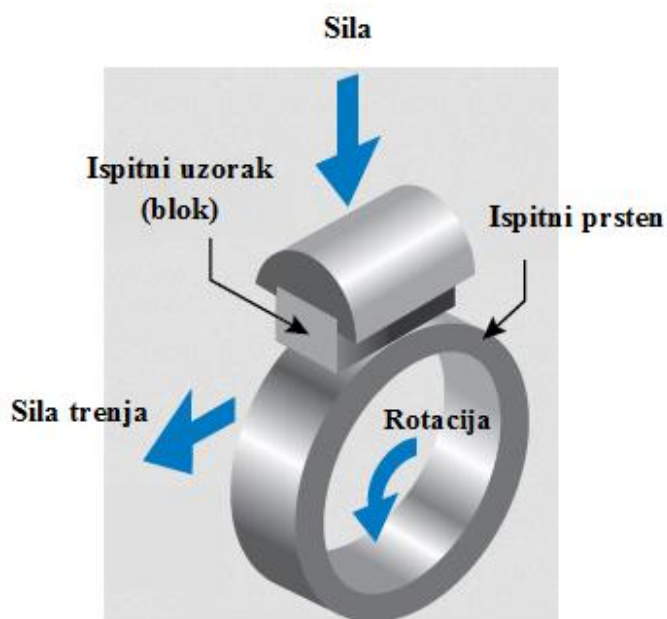
Otpornost na adhezijsko trošenje provedena je ispitnom metodom Blok na prstenu (eng Block on ring) prema normi ASTM G77. Sustav se sastoji od stacionarnog ispitnog uzorka (bloka) koji zadanom silom opterećuje rotirajući ispitni prsten, (slika 4.5.). Blok je povezan



oprugom i prilikom rotacije dolazi do otklona kazaljke, koji se očitava za određeno vrijeme. Preko vrijednosti otklona kazaljke i konstante opruge može se izračunati sila trenja, koja podijeljena sa silom opterećenja na prsten daje iznos koeficijenta trenja. Na ispitnom uzorku je nakon ispitivanja linijski trag trošenja. Rezultati se prikazuju kao gubitak volumena u  $\text{mm}^3$  i za ispitni uzorak i za ispitni prsten. Samim time materijali većeg otpora trošenju imat će manji gubitak volumena. Ispitivanje se provodi sve dok se ne postigne zadano ispitno vrijeme ili zadani broj okretaja ispitnog prstena [3].

Prilikom ispitivanja se mjeri:

- gubitak mase prstena,
- gubitak mase ispitne prizme,
- sila trenja,
- širina traga trošenja,
- izdržljivost mazivog filma.



Slika 4. 5. Prikaz metode Bloka na prstenu [15]

## **EKSPERIMENTALNI DIO**

## 5. PLAN I PROVEDBA ISPITIVANJA

### 5.1. PLAN ISPITIVANJA

Ispitivanja su provedena na prstenima kliznih ležajeva od čelika DIN 100Cr6, proizvođača NTN, oznake 1R30X35X16, skica prstena u polaznom stanju je prikazana na slici 5.1. Vanjski promjer prstena je 35 mm, unutarnji 30 mm, a širina prstena je 16 mm. Modificiranje i prevlačenje prstena provedeno je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu u Laboratoriju za toplinsku obradu. Cijeli plan provedbe pokusa prikazan je u tablici 5.1. Cilj ispitivanja bio je odrediti na koji način se mijenja koeficijent trenja kod modificiranih i prevučenih prstena u odnosu na nabavno stanje ležaja na tržištu.



Slika 5. 1. Prikaz prstena kliznog ležaja u polaznom stanju [16]

Tablica 5. 1. Plan ispitivanja

Ispitni uzorci	Ispitivanje		
	Ispitivanje hrapavosti površine	Ispitivanje mikrotvrdoće površine	Ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje
0. Polazno stanje	x	x	x
1. Nitrokarburiranje u solnoj kupci TENIFER	x	x	x
2. Nitriranje u plazmi	-	x	x
3. Prevlačenje prevlakom TiN/TiCN postupkom PAVCD	x	-	x

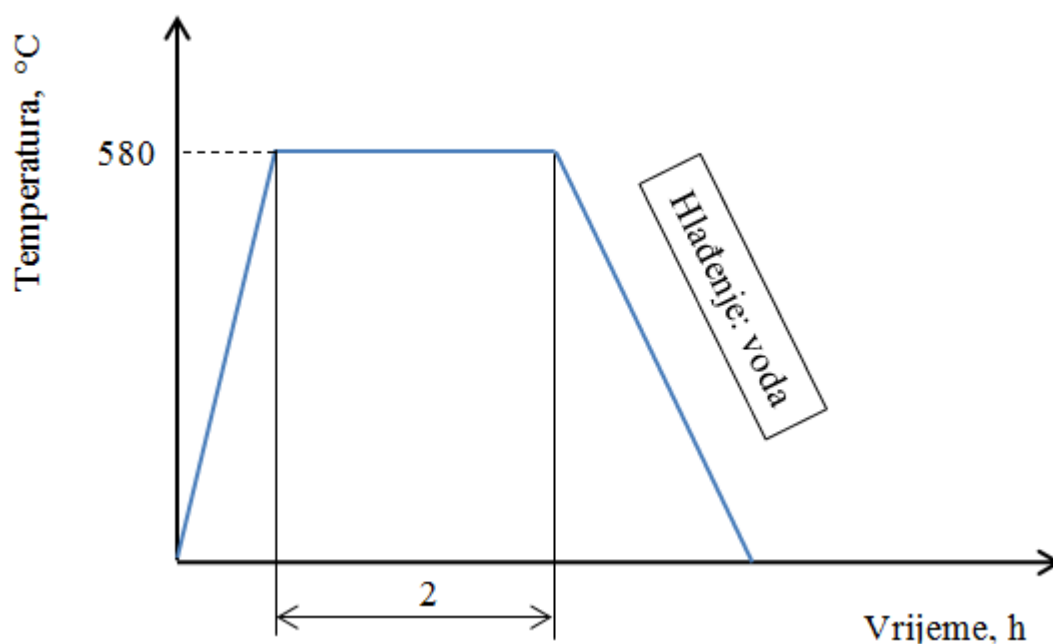
Ispitivana su četiri uzorka prstena kliznog ležaja:

- prsten kliznog ležaja u polaznom stanju,
- prsten kliznog ležaja nitrokarburiran u solnoj kupci TENIFER,
- prsten kliznog ležaja nitriran u plazmi,
- prsten kliznog ležaja prevučen prevlakom TiN/TiCN.

## 5.2. PROVEDBA MODIFICIRANJA I PREVLAČENJA

### 5.2.1. NITROKARBURIRANJE U SOLNOJ KUPCI TENIFER

Dijagram postupka nitrokarburiranja u solnoj kupci TENIFER prikazan je na slici 5.2., a parametri postupka u tablici 5.2.



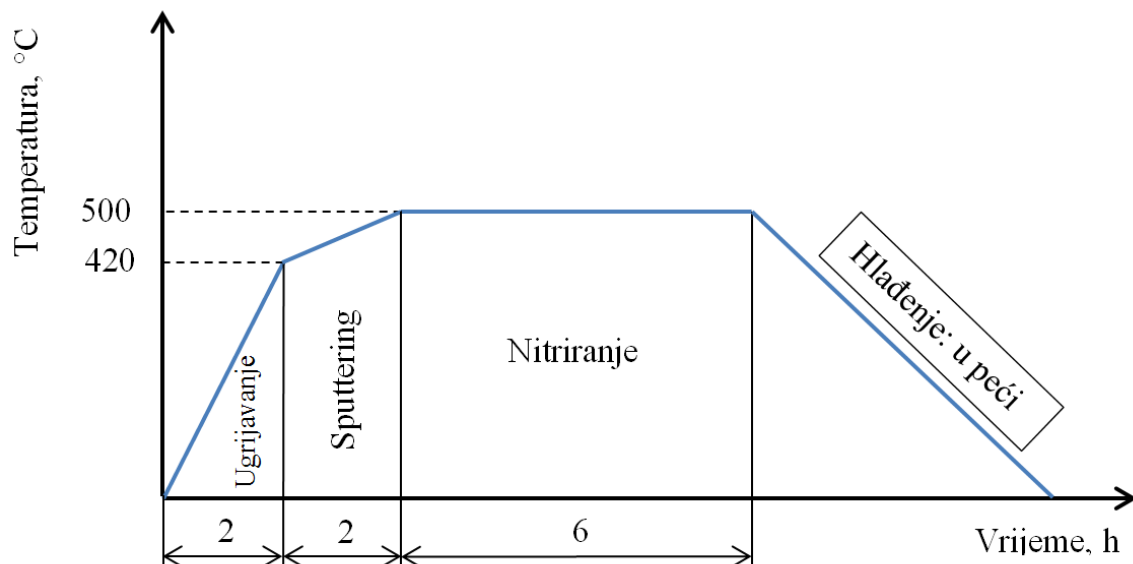
Slika 5. 2. Dijagram postupka nitrokarburiranja u solnoj kupci TENIFER

Tablica 5. 2. Parametri procesa nitrokarburiranja u solnoj kupci TENIFER

Temperatura, °C	Vrijeme, h
580	2

### 5.2.2. NITRIRANJE U PLAZMI

Nitriranje u plazmi provedeno je na uređaju Rubig PC 70/90 koji je instaliran na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, (slika 3.11.). Dijagram postupka prikazan je na slici 5.3., a parametri postupka u tablici 5.3.



Slika 5. 3. Dijagram postupka nitriranja u plazmi

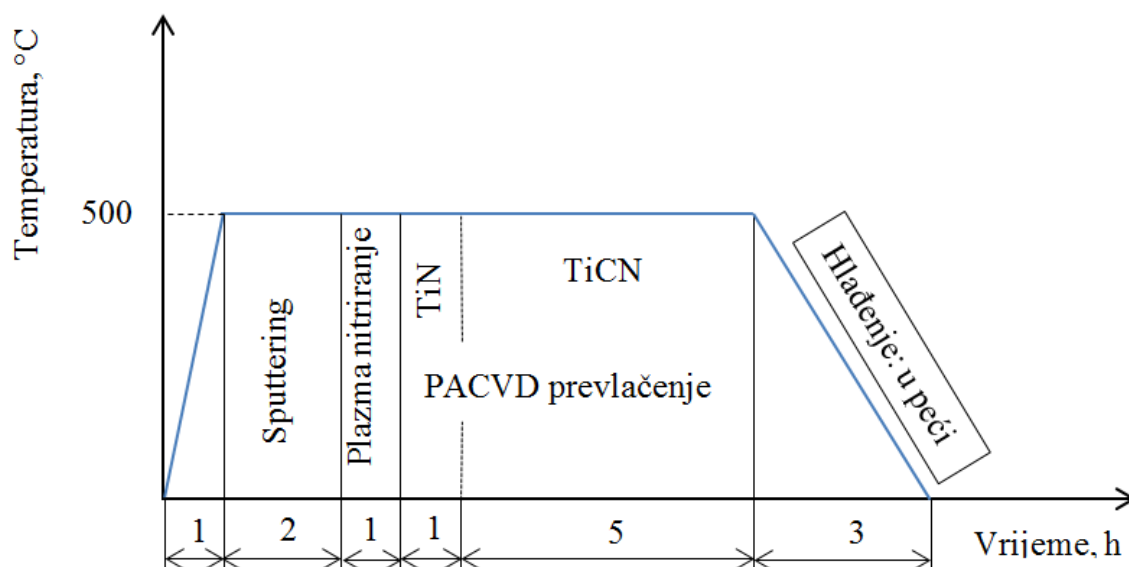
Tablica 5. 3. Parametri nitriranja u plazmi

Korak procesa	Ugrijavanje	Sputtering (čišćenje) u plazmi	Nitriranje
Temperatura, °C	20 → 420	420 → 500	500
Vrijeme, h	2 h	2 h	6 h
Tlak, mbar	2	2	2
Sastav plinova	100% H <sub>2</sub>	5% N <sub>2</sub> , 5% Ar, 90% H <sub>2</sub>	10% N <sub>2</sub> , 5% Ar, 85% H <sub>2</sub>
Napon, V	-	420 V	560 V
Snaga, W	-	1000 W	1800 W

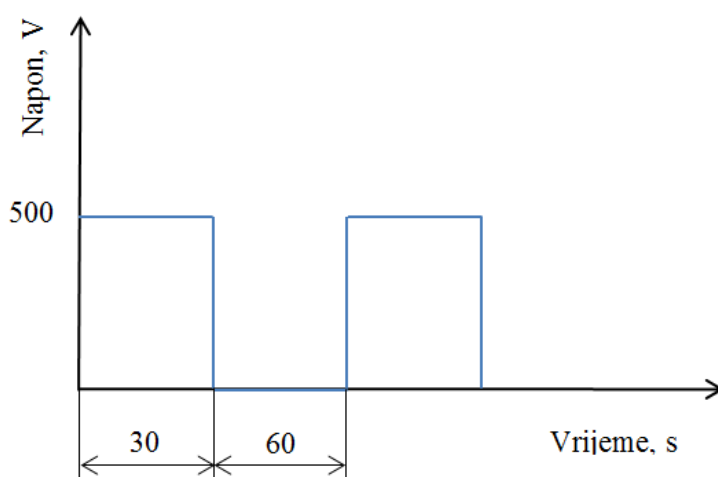
### 5.2.3. PREVLAČENJE PREVLAKOM TiN/TiCN POSTUPKOM PACVD

Prevlačenje je provedeno na uređaju Rubig PC 70/90 pomoću plazme aktivirane pulsirajućom istosmjernom strujom. Cijeli tijek dijagrama toplinske obrade prikazan je na slici 5.4., a parametri procesa u tablici 5.4. Prilikom procesa plazma se ponaša

kao binarni dijagram, odnosno izmjenjuju se generiranje napona i pauze, tj. vrijeme kada je plazma isključena, odnosno napon je 0 V. Dijagram pulsirajuće istosmjerne plazme procesa prikazan je na slici 5.5. Prevlakom TiN kao podsloj i TiCN kao sloj prevučen je i kontrapar koji je korišten prilikom ispitivanja na adhezijsko trošenje.



Slika 5. 4. Dijagram prevlačenja prevlakom TiN/TiCN postupkom PACVD



Slika 5. 5. Dijagram generiranja napona plazme i vremena pauze

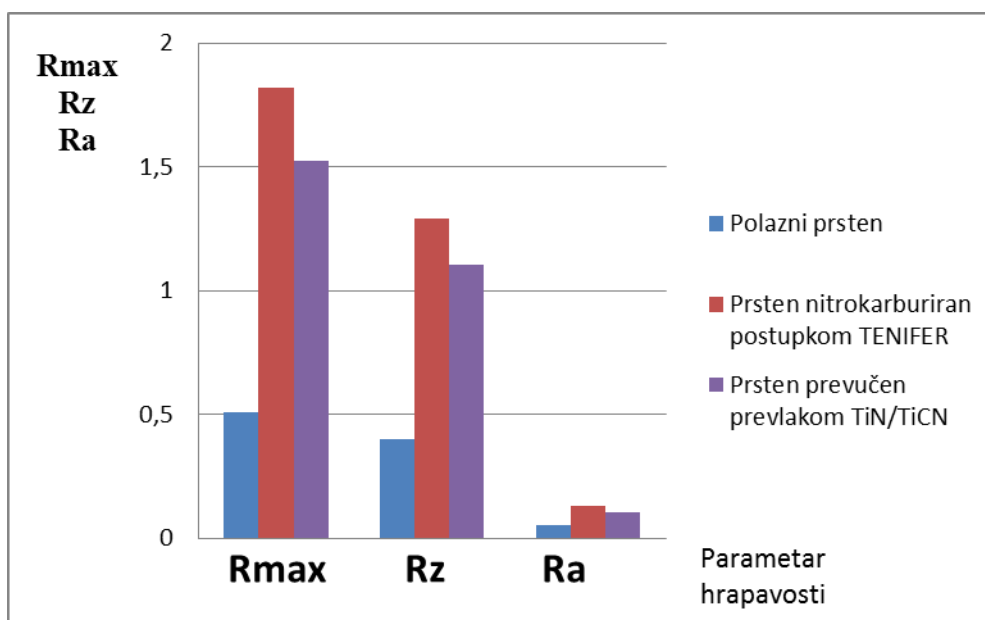
**Tablica 5. 4. Osnovi parametri prevlačenja TiN/TiCN postupkom PACVD**

Napon generatora plazme	500 V, DC
Ukupni tlak	2 mbar
Udio N <sub>2</sub>	9,5%
Udio Ar	4,5%
Udio H <sub>2</sub>	86%
Udio CH <sub>4</sub>	5 l/h
Udio TiCl <sub>4</sub>	3 l/h
Sputtering – proces čišćenja	500 °C / 2 h
Plazma nitriranje	500 °C / 1 h / 7,5 % vol N <sub>2</sub>
Prevlačenje PACVD	500 °C / (TiN / 1 h + TiCN / 5 h)

## 6. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA REZULTATA

### 6.1. ISPITIVANJE HRAPAVOSTI POVRŠINE

Ispitivanje hrapavosti provedeno je u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Provedeno je 5 ispitivanja i izračunata je srednja vrijednost. Ispitani su prsten u polaznom stanju, prsten nitrokarburiran postupkom TENIFER i prsten prevučen prevlakom TiN/TiCN postupkom PACVD, te dva kvadra koja su poslužila kao kontrapar prilikom ispitivanja otpornosti na adhezijsko trošenje. Podaci o hrapavosti prikazani su u dijagramima i za svaki od njih je dan profil hrapavosti, a ostali podaci o hrapavosti mogu se vidjeti u prilogu.

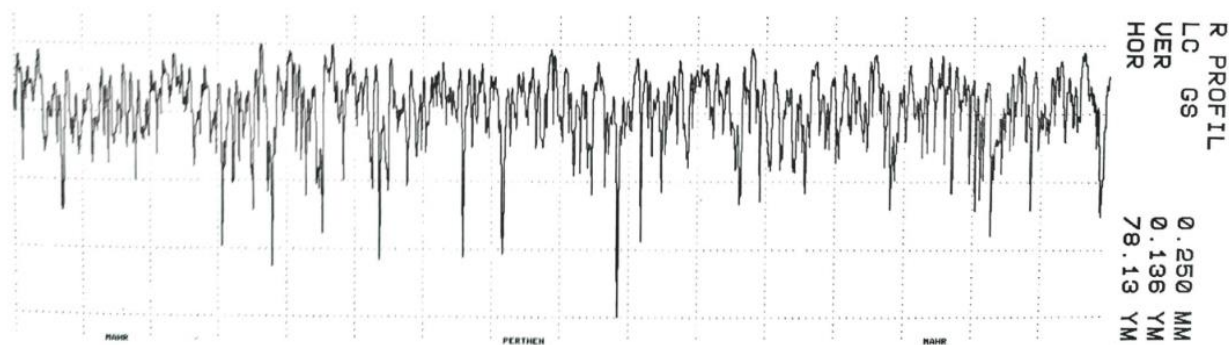


Slika 6. 1. Parametri hrapavosti za prstene

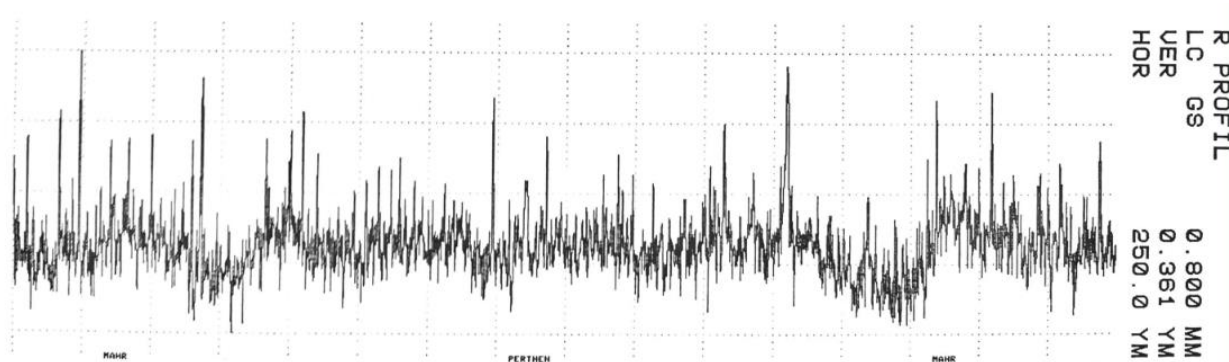
Tablica 6. 1. Vrijednost parametara hrapavosti za prstene

Parametri hrapavosti	Polazni prsten	Prsten nitrokarburiran postupkom TENIFER	Prsten prevučen prevlakom TiN/TiCN
R <sub>max</sub> , [μm]	0,506 ± 0,039	1,819 ± 0,461	1,526 ± 0,377
R <sub>z</sub> , [μm]	0,397 ± 0,026	1,291 ± 0,208	1,106 ± 0,215
R <sub>a</sub> , [μm]	0,050 ± 0,005	0,129 ± 0,016	0,104 ± 0,018

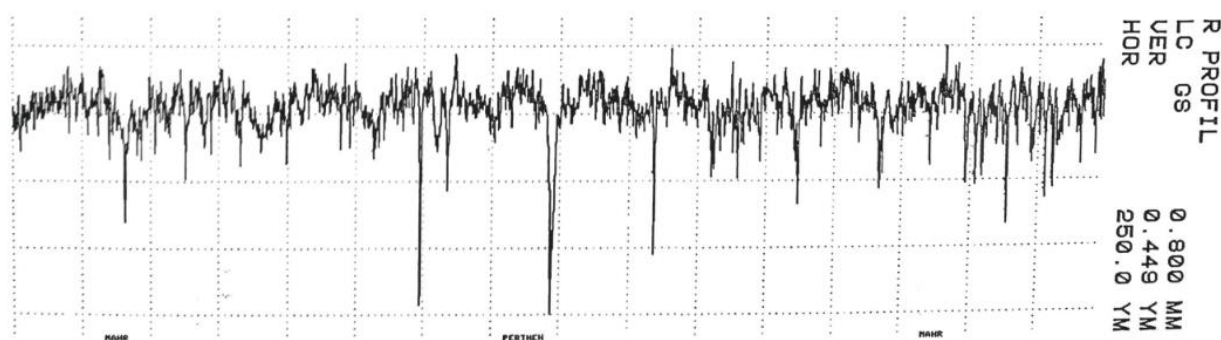




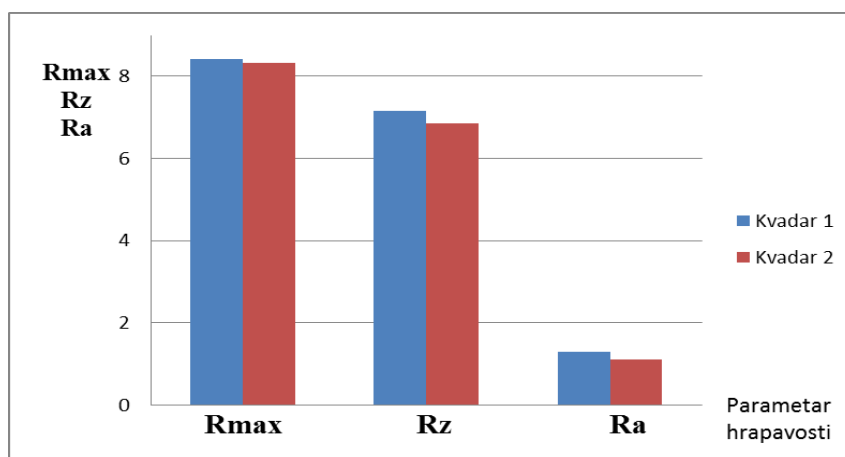
**Slika 6. 2. Izgled profila hrapavosti za polazno stanje prstena kliznog ležaja**



**Slika 6. 3. Izgled profila hrapavosti za prsten kliznog ležaja nitrokarburiran postupkom TENIFER**



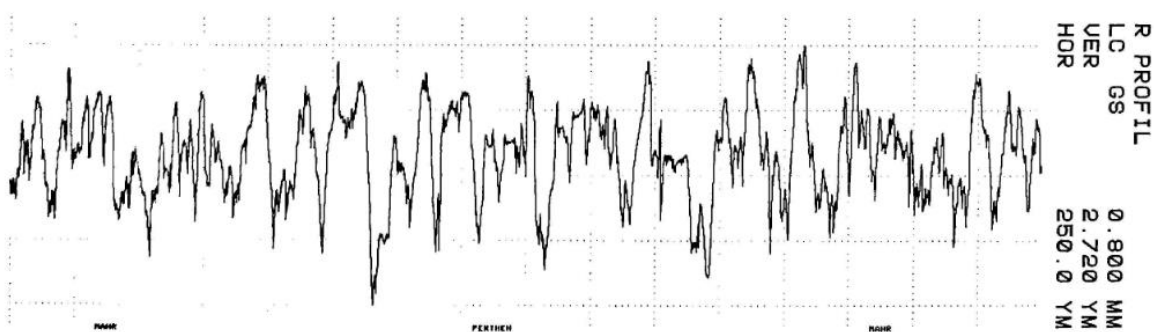
**Slika 6. 4. Izgled profila hrapavosti za prsten kliznog ležaja prevučen prevlakom TiN/TiCN postupkom PACVD**



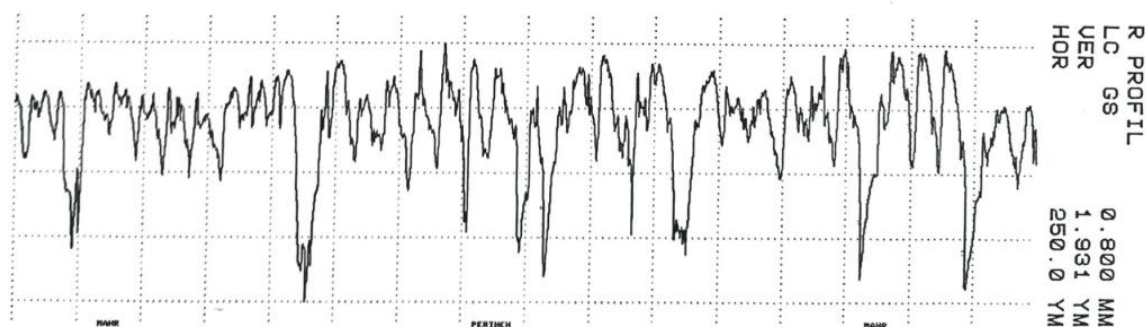
Slika 6. 5. Parametri hrapavosti za kontraparove

Tablica 6. 2. Vrijednost parametara hrapavosti za kontraparove

Parametri hrapavosti	Kvadar 1	Kvadar 2
R <sub>max</sub> , [μm]	8,42 ± 1,25	8,336 ± 0,802
R <sub>z</sub> , [μm]	7,15 ± 0,93	6,861 ± 0,228
R <sub>a</sub> , [μm]	1,29 ± 0,12	1,099 ± 0,099



a)



b)

Slika 6. 6. Izgled profila hrapavosti za a) kontrapar 1, b) kontrapar 2

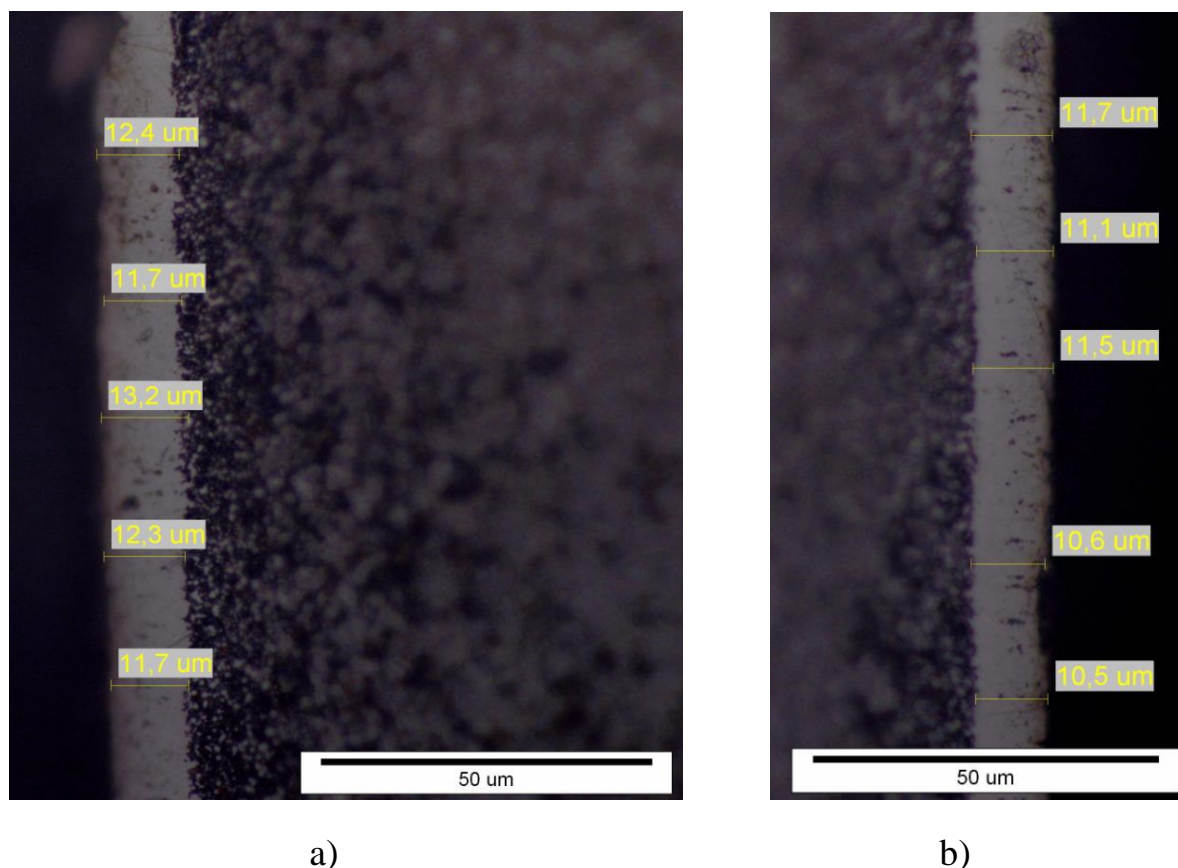
Kako je prsten kliznog ležaja industrijski proizvod za očekivati je da je hrapavost svakog prstena približno ista, pa se hrapavosti međusobno mogu uspoređivati. Hrapavost polaznog prstena je  $R_{\max}=0,506 \mu\text{m}$ , to je jedna brušena površina i na slici 6.2 se može vidjeti kako izgleda profil jedne takve površine. Kod prstena nitrokarburiranog postupkom TENIFER hrapavost je porasla skoro 3,5 puta i iznosi  $R_{\max}=1,819 \mu\text{m}$ . Kod tog postupka raste zona spojeva koja formira svoju hrapavost, te potpuno mijenja karakter izgleda profila hrapavosti (slika 6.3.). Kod prevlake hrapavost iznosi  $R_{\max}=1,526 \mu\text{m}$ . Kako je to tanka prevlaka ona je povećala hrapavost za  $1 \mu\text{m}$ , ali je profil hrapavosti ostao zadržan kakav je bio kod polaznog prstena.

## 6.2. ODREĐIVANJE EFEKTIVNE DUBINE NITRIRANJA I MIKROTVRDOĆE POVRŠINE

Efektivna dubina nitriranja određena je na prstenu nitrokarburiranom u solnoj kupci TENIFER. Kako bi pripremili uzorak za ispitivanje morali smo ga izrezati na metalografskoj rezalici te ga zaliti u polimernu masu radi lakšeg rukovanja s uzorkom, (slika 6.7.). Nakon brušenja i poliranja uzorak je nagrižen 3% Nitalom u trajanju 5 sekundi na sobnoj temperaturi. Odmah je na svjetlosnom mikroskopu marke Olympus GX51 pogledana mikrostruktura i zona spojeva nitriranja, (slika 6.8.).



Slika 6. 7. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51 i uzorak zaliven u polimernu masu



**Slika 6. 8. Debljina zone spojeva: a) unutrašnji dio prstena, b) vanjski dio prstena**

Srednja vrijednost unutrašnjeg dijela zone spojeva iznosi  $12,26 \mu\text{m}$ , dok vanjska zona spojeva prstena iznosi  $11,08 \mu\text{m}$ . Do te razlike je došlo zbog toga što prilikom nitrokarburiranja zbog strujanja soli potaknute propuhivanjem kupke zrakom na vanjskoj površini prstena zrak odnosi dušik i on se manje veže sa željezom te manje stvara željezne nitride. Unutar prstena je kupka mirnija i samim time se stvara više željeznih nitrida.

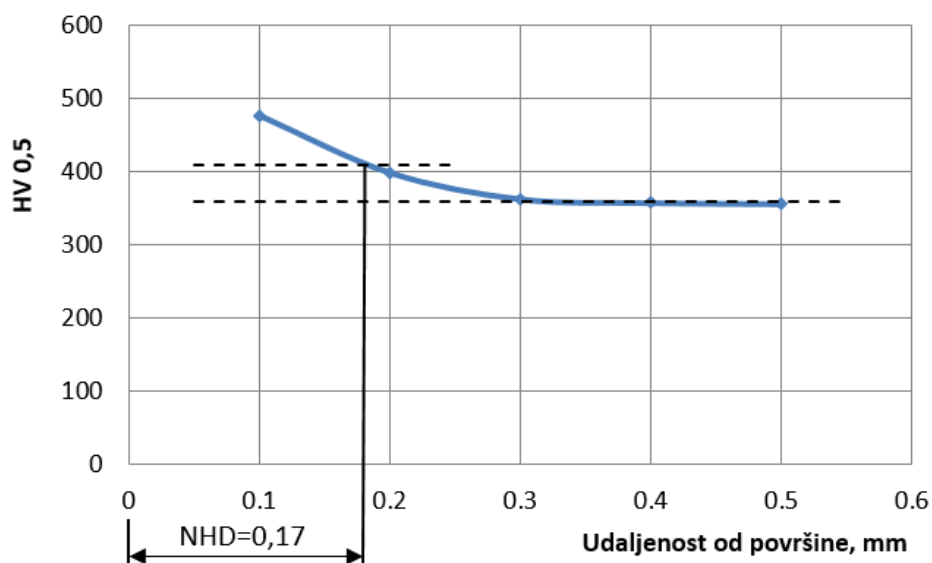
Mikrotvrdoća je ispitana na tvrdomjeru „Wilson – Wolpert Tukon 2100B“, normom propisanom kod mjerenja mikrotvrdoće nitriranog sloja HV0,5. Prvo je provedeno ispitivanje mikrotvrdoće jezgre, a nakon toga po 5 ispitivanja za vanjski i unutarnji dio prstena i postupak je ponovljen 2 puta, kako bi se mogao konstruirati dijagram i odrediti efektivna dubina nitriranja. Na prstenu nitriranom u plazmi postupkom PACVD, ispitana je površinska mikrotvrdoća opterećenjem HV0,5 po rubu prstena. Rezultati su navedeni u tablicama.

**Tablica 6. 3. Rezultati ispitivanja jezgre prstena nitrokarburiranog u solnoj kupci TENIFER**

Redni broj mjerjenja	HV0,5
1.	369
2.	360
3.	350
Srednja vrijednosti	$359,67 \pm 9,50$

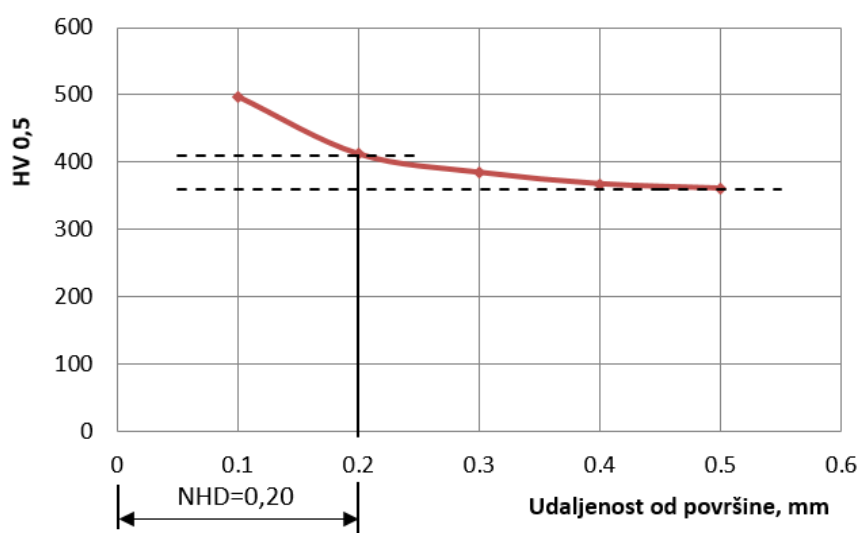
**Tablica 6. 4. Rezultati ispitivanja tvrdoće za unutarnji dio prstena**

Udaljenost od ruba prstena	1. mjerjenje HV0,5	2. mjerjenje HV0,5	Srednja vrijednost
0,1	503	450	476,5
0,2	401	397	399
0,3	366	360	363
0,4	360	356	358
0,5	353	360	356,5

**Slika 6. 9. Raspon tvrdoće od ruba prema jezgri za unutarnji dio prstena**

**Tablica 6. 5. Rezultati ispitivanja tvrdoće za vanjski dio prstena**

Udaljenost od ruba prstena	1. mjerenje HV0,5	2. mjerenje HV0,5	Srednja vrijednost
0,1	503	492	497,5
0,2	408	416	412
0,3	386	383	384,5
0,4	369	366	367,5
0,5	366	356	361

**Slika 6. 10. Raspon tvrdoće od ruba prema jezgri za vanjski dio prstena****Tablica 6. 6. Rezultati ispitivanja tvrdoće za rub prstena nitiranog u plazmi**

Redni broj mjerenja	HV0,5
1.	834
2.	715
3.	752
4.	846
5.	802
Srednja vrijednost	$789,8 \pm 55,41$

**Tablica 6. 7. Rezultati ispitivanja tvrdoće za rub prstena nitrokarburiranog u solnoj kupci TENIFER**

Redni broj mjerjenja	HV0,5
1.	813
2.	802
3.	771
4.	791
5.	802
Srednja vrijednost	$795,8 \pm 15,90$

Iz provedenih ispitivanja gore navedenih uzoraka zaključuje se sljedeće:

- mikrotvrdoća jezgre ispitnih uzoraka iznosi  $360 \pm 10$  HV0,5
- tvrdoća površine nitrokarburirane postupkom TENIFER iznosi  $796 \pm 16$  HV0,5
- tvrdoća površine nitrirane u plazmi iznosi  $790 \pm 55$  HV0,5
- efektivna dubina nitriranja na vanjskoj površini prstena nakon postupka TENIFER iznosi:  $NHD = 0,20 \mu m$
- efektivna dubina nitriranja na unutrašnjoj površini prstena nakon postupka TENIFER iznosi:  $NHD = 0,17 \mu m$

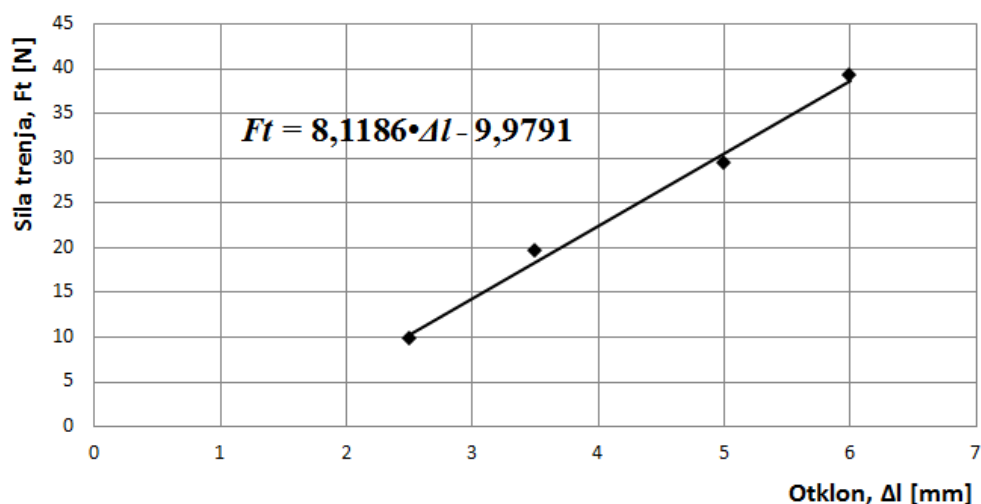


### 6.3. ISPITIVANJE OTPORNOSTI NA ADHEZIJSKO TROŠENJE

Ispitivanje je provedeno metodom Blok na prstenu. Prvo je izvršena kalibracija opruge kako bi mogli odrediti konstantu savojne opruge, te iz toga kasnije dobiti silu trenja za pojedine prstene. Kalibracija je ponovljena 4 puta i na temelju toga je napravljena linearna digresija što se može vidjeti na slici 6.11.

Tablica 6. 8. Vrijednosti sile savijanja opruge u postupku kalibracije

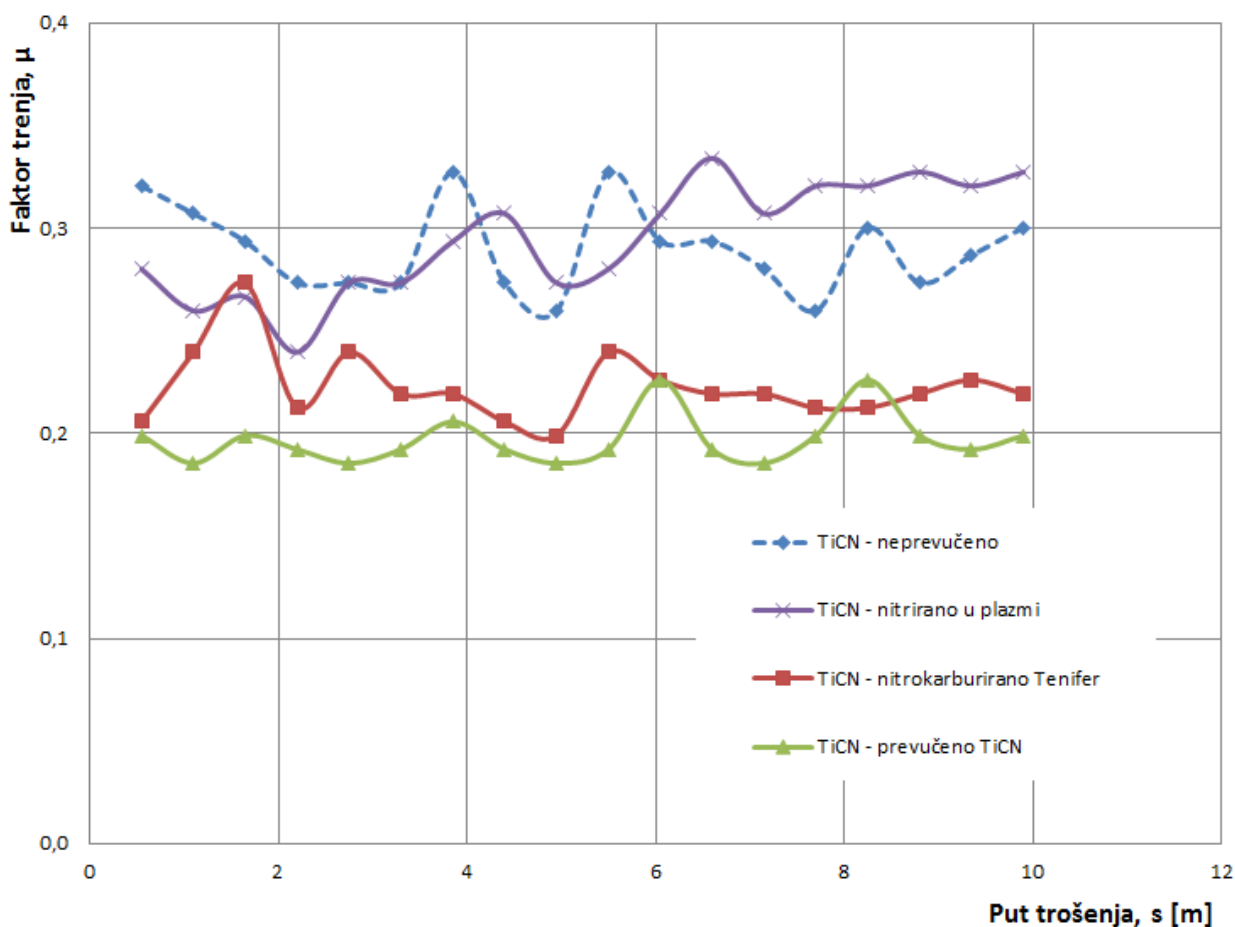
SILA TRENJA $F_t$ [N]	OTKLON $\Delta l$ [mm]
9,81	2,5
19,62	3,5
29,43	5
39,24	6



Slika 6. 11. Kalibracija opruge uređaja za ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje

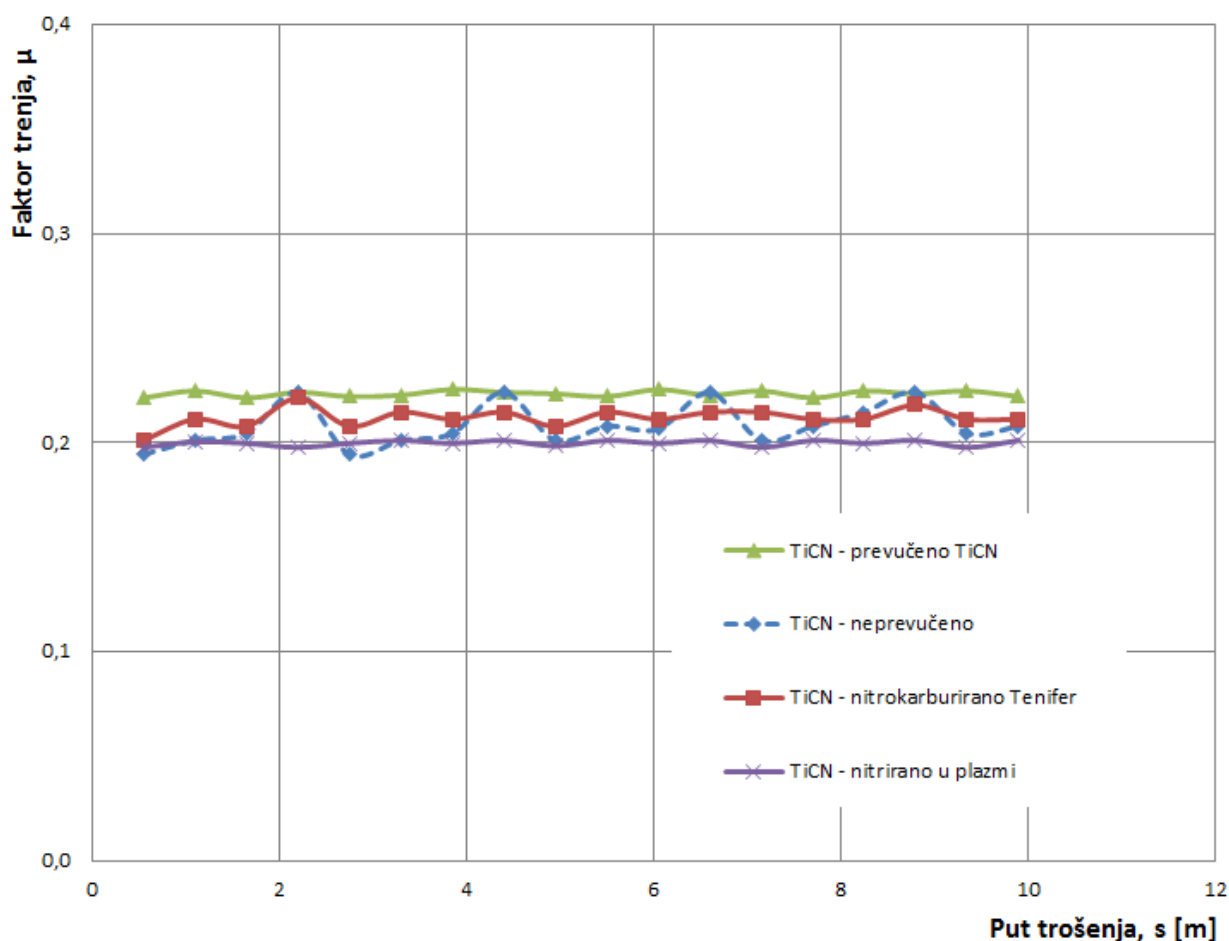
Nakon kalibracije svaki prsten je ispitivan normalnom silom od 60 N, te od 120 N. Ispitivanje za svaki prsten je trajalo 180 minuta i nakon svakih 10 sekundi je zabilježen otklon kazaljke. Na temelju podataka izračunat je koeficijent trenja. Podaci za svaki prsten se mogu vidjeti u nastavku, a polazni podaci su dani u prilogu. Kontrapar bio je čelik AISI 304, to je standardni nehrđajući čelik europske norme X5CrNi18-10.





**Slika 6. 12. Ovisnost faktora trenja o putu trošenja za sva četiri tribo sustava kod normalne sile  $F_N=60$  N**

Iz slike 6.12 se uočavaju ovisnosti za sva četiri tribo sustava ispitanih s normalnom silom od 60 N. Nakon puta trošenja od 4 m, odnosno nakon početnog uhodavanja tribopara prsten nitriran u plazmi se ponaša slično kao i prsten nitrokarburiran u solnoj kupci TENIFER. Kod ta dva uzoraka nastao je nitrirani sloj koji ravnomjerno kliže po prevlaci TiCN. Nitrokarburirani prsten u početku ima veće početno trošenje, ali kad je nastao trag trošenja, odnosno klizna staza, poprima sličan iznos faktora trenja kao i prsten nitriran u plazmi. Kod prstena nitriranog u plazmi nije nastala zona spojeva, pa se on ponaša slično kao i polazni nemodificirani prsten.



**Slika 6. 13. Ovisnost faktora trenja o putu trošenja za sva četiri tribo sustava kod normalne sile  $F_N=120$  N**

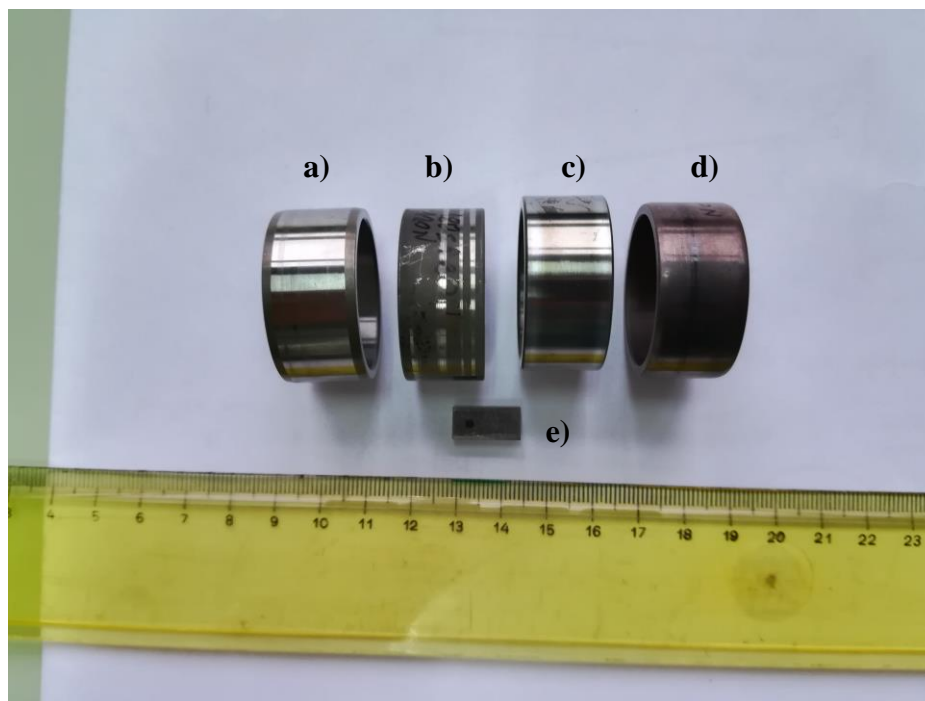
Slika 6.13 prikazuje ovisnost sva četiri tribo sustava kod opterećenja normalnom silom od 120 N. Kod tog većeg opterećenja odmah na početku pokusa došlo je do uhodavanja tribopara, tj. stvaranja klizne staze. Stoga svi ispitivani prsteni daju slične vrijednosti faktora trenja. Vidi se da prsten nitrokarburiran u solnoj kupci TENIFER dobro podnosi opterećenje jer ima sličan faktor trenja za normalno opterećenje od 60 i 120 N. Kod tog postupka debljina zone spojeva iznosi oko 10  $\mu\text{m}$ , pa treba više vremena da se taj sloj probije i dođe do trošenja osnovnog materijala. Prsten nitriran u plazmi se ponaša vrlo stabilno. Kod njega u difuzijskoj zoni nije nastala zona spojeva, ali dušik otopljen u difuzijskoj zoni pridonosi stabilnom faktoru trenja. Prsten s prevlakom PACVD TiN/TiCN ima nešto veći faktor trenja u odnosu na nitrirane prstene. Ovdje je veći faktor trenja posljedica adhezijskog trošenja istovrsnih PACVD prevlaka na prstenu i kvadru. Kod površinski nemodificiranog prstena pojavljuju se oscilacije u vrijednosti faktora trenja slično kao i kod nižeg opterećenja od 60 N.

**Tablica 6. 9. Srednji faktor trenja ispitnih prstena pri normalnom opterećenju 60 i 120 N**

Ispitni uzorak	$F_N=60\text{ N}$	$F_N=120\text{ N}$
1. Nprevučeni (polazno stanje)	$0,27 \pm 0,11$	$0,19 \pm 0,10$
Nitrokarburiran TENIFER	$0,20 \pm 0,10$	$0,20 \pm 0,10$
Nitirano u plazmi	$0,27 \pm 0,11$	$0,18 \pm 0,10$
PACVD TiN/TiCN	$0,18 \pm 0,10$	$0,21 \pm 0,10$

U tablici 6.9 mogu se vidjeti rezultati srednjeg faktor trenja ispitnih prstena pri normalnom opterećenju od 60 i 120 N dobivenih iz ispitivanja otpornosti na adhezijsko trošenje metodom Bloka na prstenu.

Prsteni nakon ispitivanja prikazani su na slici 3.14. gdje se malo mogu vidjeti tragovi trošenja. Na Stereo mikroskopu Leica MZ6 su uz povećanje 10 puta ti tragovi bolje vidljivi.



**Slika 6. 14. Prsteni nakon ispitivanja na adhezijsko trošenje: a) polazni prsten, b) prsten nitrokarburiran u solnoj kupci TENIFER, c) prsten nitriran u plazmi postupkom PACVD, d) prsten prevučen prevlakom TiN/TiCN postupkom PACVD, e) kontrapar**

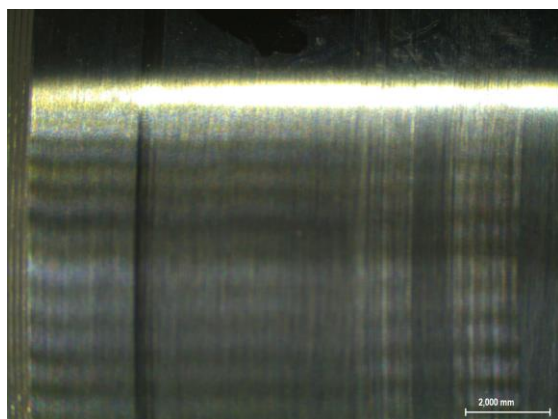


**a)**

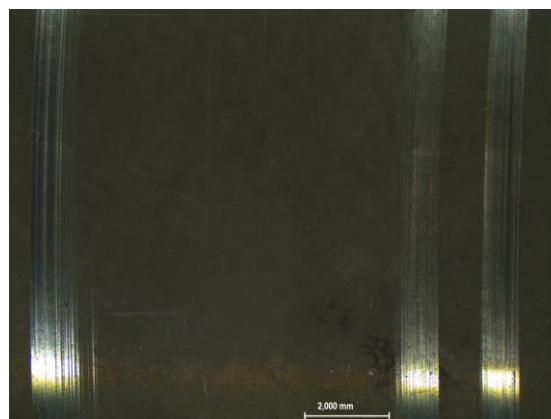


**b)**

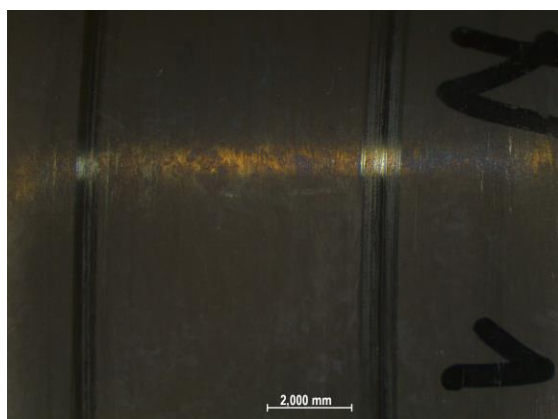
**Slika 6. 15. a) Uređaj za ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje i b) Stereo mikroskop Leica MZ6**



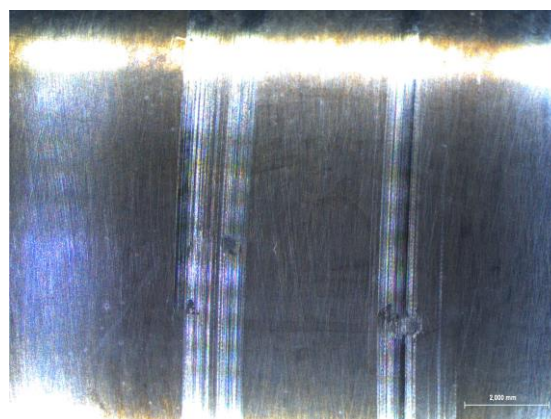
a)



b)



c)



d)

**Slika 6. 16. Prikazi tragova trošenja snimljene stereo mikroskopom Leica MZ6: a) prsten u polaznom stanju, b) prsten nitrokarburiran postupkom TENIFER, c) prsten prevučen prevlakom TiN/TiCN, d) prsten nitriran u plazmi**

Slika 6.16. d) nam daje odgovor na to zašto su prilikom ispitivanja bile prisutne oscilacije. Pod povećanjem 10 puta na stereo mikroskopu vide se tragovi oštećenja. To je posljedica stvaranja naljepka odnosno hladnog zavara te njegovo kasnije otkidanje i takvo ponavljanje ciklusa tijekom pokusa. Prilikom stvaranja tog naljepka faktor trenja raste, a kada se ta čestica poveća i dođe do njezinog otkidanja faktor trenja naglo padne i zbog toga su prisutne oscilacije. Kod još veće sile sustav bi bio još stabilniji i oscilacije bi bile još manje, a kada bi ta sila bila jako velika došlo bi do zaribavanja.

## 7. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja hrapavosti površine, analize mikrostrukture rubnog sloja i otpornosti na adhezijsko trošenje na toplinski obrađenim uzorcima prstena kliznog ležaja od čelika DIN 100Cr6 nitrokarburiranih u solnoj kupci TENIFER, nitriranih u plazmi i prevučenih prevlakom TiN/TiCN postupkom PACVD dolazi se do sljedećih spoznaja.

Iz rezultata hrapavosti površine slijedi da se postupcima nitriranja i nitrokarburiranja može povećati hrapavost i mijenjati profil hrapavosti u odnosu na polaznu nisku hrapavost koja je definirana obradom glodanja i brušenja. Prevlakom je moguće povećati hrapavost dok profil hrapavosti ostaje zadržan kakav je bio kod polaznog prstena. Iz analize mikrostrukture uočena je različita debljina zone spojeva i debljina nitriranja na vanjskom i unutrašnjem dijelu prstena nakon nitrokarburiranja u solnoj kupci TENIFER.

Iz rezultata ispitivanja površinske tvrdoće utvrđena je srednja vrijednost od  $790 \pm 55$  HV0,5 za tvrdoću površine nitrirane u plazmi, te  $796 \pm 16$  HV0,5 za tvrdoću površine nitrokarburirane postupkom TENIFER. Srednja vrijednost unutrašnjeg dijela zone spojeva iznosi  $12,26 \mu\text{m}$ , a efektivna dubina nitriranja  $0,17 \text{ mm}$ , dok vanjska zona spojeva prstena iznosi  $11,08 \mu\text{m}$ , a efektivna dubina nitriranja  $0,20 \text{ mm}$ .


Iz ispitivanja faktora trenja tribopara kvadra prevučenog PACVD prevlakom i prstena nitrokarburiranih u solnoj kupci TENIFER, nitriranih u plazmi i prevučenih prevlakom TiN/TiCN dobiveni su sljedeći rezultati. Kod opterećenja normalno silom od  $60 \text{ N}$  najveći faktor trenja ima polazno stanje prstena, a najmanji prsten prevučen PACVD prevlakom TiN/TiCN. U drugom slučaju kod opterećenja normalnom silom od  $120 \text{ N}$  najveći faktor trenja ima prsten prevučen PACVD prevlakom TiN/TiCN, a najmanji prsten nitriran u plazmi.

## LITERATURA

- [1] Vučković K., Podloge uz predavanja iz kolegija „*Elementi konstrukcija II*“, Ležajevi, autorizirana predavanja, FSB, Zagreb, 2017.
- [2] Decker K. H., Elementi strojeva, Golden marketing – Tehniška knjiga, Zagreb, 2000.
- [3] Grilec K., Jakovljević S., Marić G., Tribologija u strojarstvu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [4] Landek D., Predavanje iz kolegija „*Posebni metalni materijali*“, dio „*Alatni materijali*“, autorizirana predavanja, FSB, Zagreb, 2017.
- [5] Filetin T., Kovačiček F., Indof J., Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [6] Novosel M., Cajner F., Krumes D., Alatni materijali, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 1996.
- [7] <https://steelnavigator.ovako.com/steel-grades/100cr6/pdf?...18> dostupno (12.2.2018.)
- [8] [http://www.ims.it/ims/ims\\_spa/cmscontent.nsf/DocumentsByIDWeb/5YWH3Q/\\$File/100Cr6.pdf](http://www.ims.it/ims/ims_spa/cmscontent.nsf/DocumentsByIDWeb/5YWH3Q/$File/100Cr6.pdf) dostupno (12.2.2018)
- [9] Krumes D., Toplinska obradba, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2000.
- [10] Matijević B., Predavanja iz kolegija „*Toplinska obrada*“, Toplinsko-kemijsko modificiranje površine čelika, karbonitriranje, nitiranje, nitrokarburiranje, autorizirana predavanja, FSB, Zagreb, 2016.
- [11] Kovačić S., Vježbe iz kolegija „*Tribologija i inženjerstvo površina*“, vježba 5. Prevlačenje površine postupkom PACVD, autorizirana predavanja, FSB, 2016.
- [12] Cajner F., Kumić I., Kovačić S., Cingesar M., Publikacija ARISE projekta, FSB, Zagreb, 2014.
- [13] Badisch E., Fontalvo G., A., Mitterer C., The response of PACVD TiN coatings to tribological tests with different counterparts, Science direct, Wear, 2004.
- [14] Alar Ž., Predavanja iz kolegija „*Materijali I*“, treći dio Mehanička svojstva materijala, autorizirana predavanja, FSB, Zagreb, 2016.
- [15] <http://extremecoatings.net/resources/test-results/adhesive-wear-test-astm-g77.html> dostupno (13.2.2018.)
- [16] [http://www.ntnamericas.com/en/website/documents/brochures-and-literature/catalogs/needle\\_roller\\_bearings\\_2300-vii\\_lowres.pdf](http://www.ntnamericas.com/en/website/documents/brochures-and-literature/catalogs/needle_roller_bearings_2300-vii_lowres.pdf) dostupno (16.2.2018.)

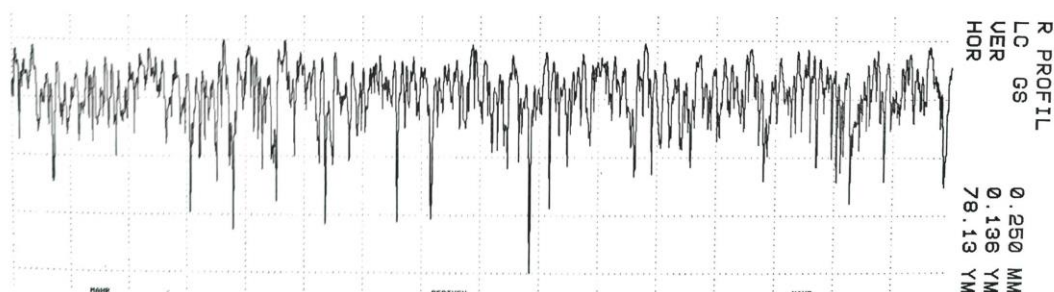
## PRILOG I: HRAPAVOSTI POVRŠINA

perthometer S8P 4.5

		LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUŽINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB		OBJEKT: CILINDAR HR.: NAME: G.BARSIC MESS.-HR.: 5 T1 RHT 6-50 50 6	
LT	1.750 MM				
LM	1.250 MM				
UB	12.50 YM				


KENNWERT			STATISTIK N = 5							
	LC	GS	0.250 MM	X	S	R	MAX	MIN	HN	TH
1	RMAX		YM	0.506	0.039	0.095	0.536	0.440		
2	RZ		YM	0.397	0.026	0.066	0.428	0.362		
3	RA		YM	0.050	0.005	0.012	0.056	0.043		
4	RP		YM	0.134	0.017	0.043	0.163	0.121		
5	RPM		YM	0.118	0.010	0.024	0.133	0.109		
6	WT		YM	0.063	0.014	0.034	0.077	0.043		
7	RT		YM	0.527	0.049	0.131	0.581	0.449		
8	PT		YM	0.548	0.033	0.087	0.578	0.491		



Slika 8. 1. Profil hrapavosti i parametri polaznog prstena kliznog ležaja

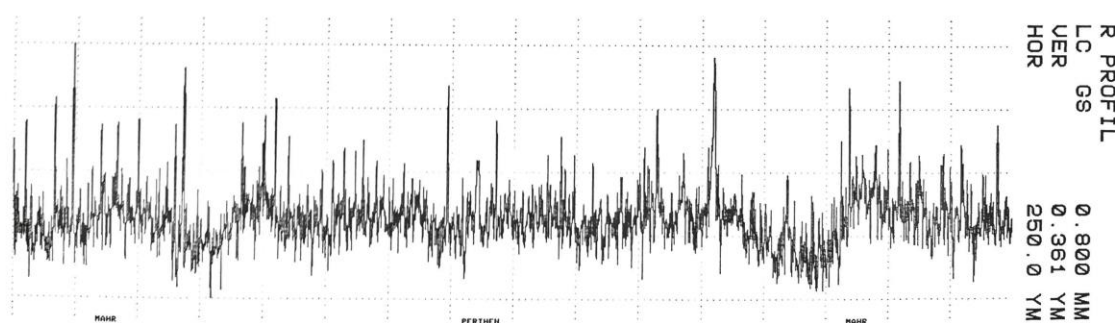


perthometer S8P 4.5

		LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUŽINA  FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB		OBJEKT: CILINDAR 22.01.2018. NR.: NAME: G.BARSIC  MESS.-NR.: 5 T1 RHT 6-50 50 6	
LT	5.600 MM				
LM	4.000 MM				
UB	12.50 YM				

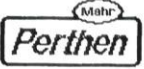
  

KENNWERT			STATISTIK N = 5							
	LC	GS	0.800 MM	X	S	R	MAX	MIN	HH	TH
1	RMAX		YM	1.819	0.461	1.177	2.622	1.445		
2	RZ		YM	1.291	0.208	0.565	1.572	1.008		
3	RA		YM	0.129	0.016	0.041	0.155	0.114		
4	RP		YM	1.360	0.465	1.171	2.157	0.986		
5	RPM		YM	0.855	0.203	0.557	1.109	0.552		
6	WT		YM	0.554	0.292	0.787	0.954	0.167		
7	RT		YM	1.955	0.568	1.468	2.905	1.445		
8	PT		YM	2.229	0.488	1.187	2.964	1.777		



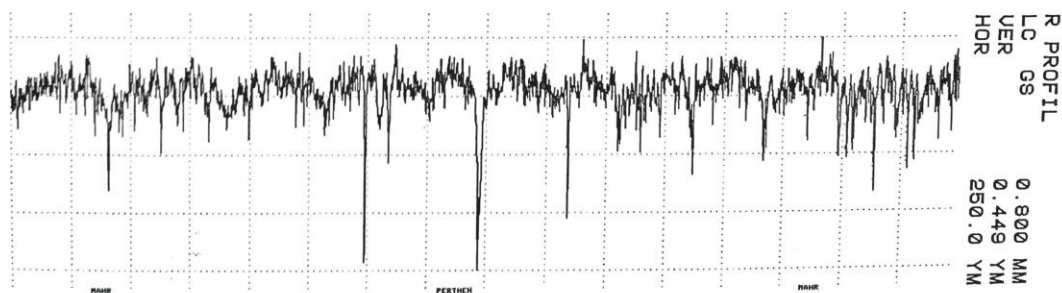
Slika 8. 2. Profil hrapavosti i parametri prstena kliznog ležaja nitrokarburiranog u solnoj kupci  
TENIFER

perthometer S8P 4.5

		LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB		OBJEKT: CILINDAR S PREVLAKOM HR.: NAME: G. BARSIC MESS.-HR.: 5 T1 RHT 6-50 50 6	
LT	5.600 MM				
LM	4.000 MM				
VB	12.50 YM				


  

KENNWERT				STATISTIK N = 5						
	LC	GS	0.800 MM	X	S	R	MAX	MIN	HH	TH
1	RHAX		YM	1.526	0.377	0.931	2.072	1.141		
2	RZ		YM	1.106	0.215	0.522	1.329	0.807		
3	RA		YM	0.104	0.018	0.050	0.127	0.076		
4	RP		YM	0.462	0.090	0.228	0.603	0.375		
5	RPM		YM	0.368	0.050	0.132	0.453	0.321		
6	WT		YM	0.421	0.197	0.400	0.729	0.249		
7	RT		YM	1.629	0.358	0.863	2.163	1.300		
8	PT		YM	1.783	0.219	0.578	2.138	1.560		



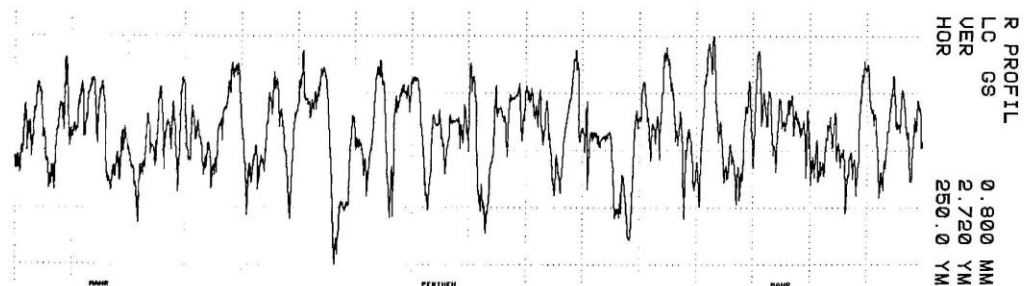
**Slika 8. 3. Profil hrapavosti i parametri prstena kliznog ležaja prevučenog prevlakom TiN/TiCN postupkom PACVD**

perthometer S8P 4.5

		LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUŽINA  FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB		OBJEKT: KVADAR 1  HR.: NAME: G. BARSIC  MESS.-HR.: 5 T8 FRU-750 750 26	
LT	5.600 MM				
LM	4.000 MM				
UB	125.0 YM				


  

KENNWERT				STATISTIK N = 5						
	LC	GS	Ø. 800 MM	X	S	R	MAX	MIN	HH	TH
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
	RMAX		YM	8.42	1.25	3.11	9.91	6.81		
	RZ		YM	7.15	0.93	2.11	8.29	6.19		
	RA		YM	1.29	0.12	0.28	1.46	1.17		
	RP		YM	3.76	0.79	1.77	4.70	2.93		
	RPM		YM	3.05	0.46	1.10	3.71	2.61		
	WT		YM	5.35	2.71	6.91	9.26	2.35		
	RT		YM	8.63	1.30	3.13	10.15	7.03		
	PT		YM	11.91	1.59	4.07	13.88	9.81		



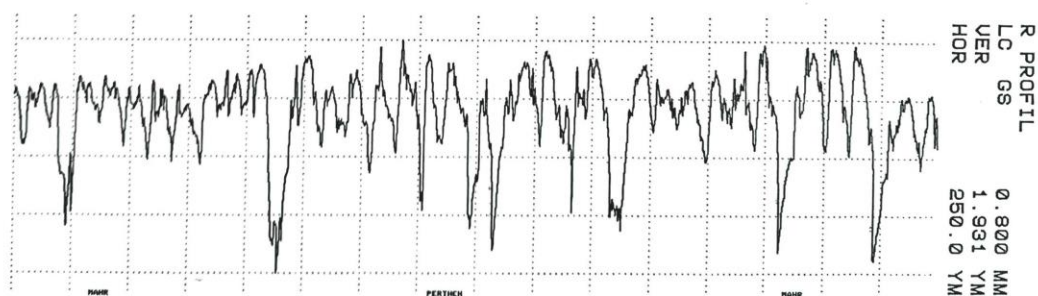
Slika 8. 4. Profil hrapavosti i parametri kontrapara kvadra 1.

perthometer S8P 4.5

		LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA  FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB		OBJEKT: KVADAR 2  HR.: HANE: G. BARŠIĆ  MESS.-NR.: 5 T1 RHT 6-50 50 6	
LT	5.600 MM				
LM	4.000 MM				
UB	12.50 YM				

KENNWERT			STATISTIK N = 5							
	LC	GS	Ø. 800 MM	X	S	R	MAX	MIN	HH	TH
1	RMAX		YM	8.336	0.802	1.062	9.353	7.491		
2	RZ		YM	6.861	0.228	0.539	7.053	6.513		
3	RA		YM	1.099	0.099	0.215	1.208	0.993		
4	RP		YM	3.141	0.704	1.511	3.917	2.406		
5	RPM		YM	2.417	0.288	0.629	2.663	2.033		
6	WT		YM	3.363	1.062	4.665	6.599	1.933		
7	RT		YM	8.688	0.962	2.042	9.623	7.581		
8	PT		YM	10.08	1.401	3.331	11.87	8.536		



Slika 8. 5. Profil hrapavosti i parametri kontrapara kvadra 2.

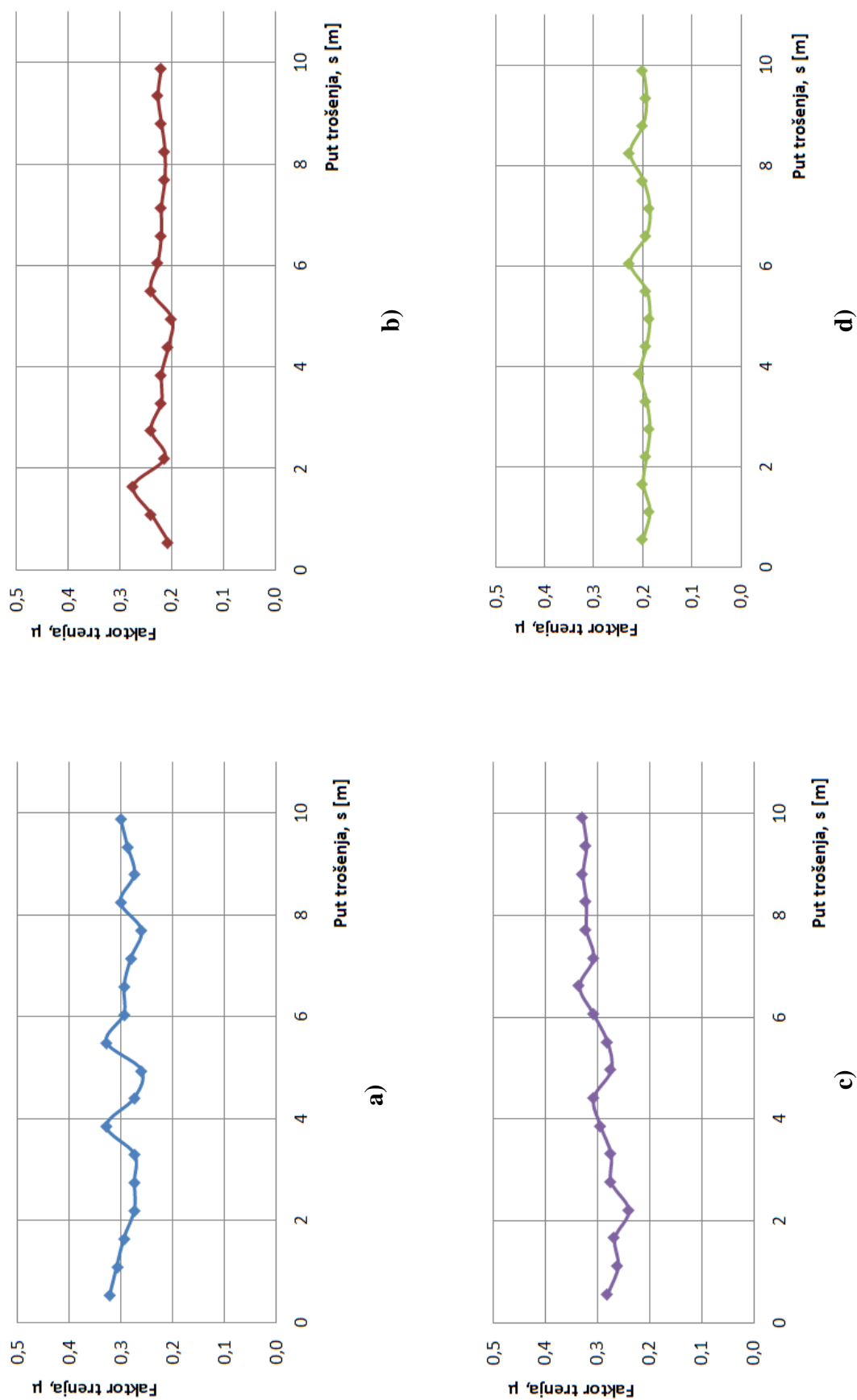
## PRILOG II: REZULTATI ISPITIVANJA OTPORNOSTI NA ADHEZIJSKO TROŠENJE

FN=60 N															
TRIBO PAR		Kvadar 1 - polazni prsten				Kvadar 1 - prsten nitrokarburiran TENIFER				Kvadar 1 - prsten nitriran u plazmi				Kvadar 1 - prsten prevučen TiN/TiCN	
Vrijeme t [S]	Put trošenja s [m]	Otklon $\Delta l_1$ [mm]	Sila trenja Ftr [N]	Faktor trenja $\mu$	Otklon $\Delta l_2$ [mm]	Sila trenja Ftr [N]	Faktor trenja $\mu$	Otklon $\Delta l_3$ [mm]	Sila trenja Ftr [N]	Faktor trenja $\mu$	Otklon $\Delta l_4$ [mm]	Sila trenja Ftr [N]	Faktor trenja $\mu$	Otklon $\Delta l_5$ [mm]	Faktor trenja $\mu$
0	0	0,00	-9,98	-0,17	0,00	-9,98	-0,17	0,00	-9,98	-0,17	0,00	-9,98	-0,17	0,00	-0,17
10	0,55	3,60	19,25	0,32	2,75	12,35	0,21	3,30	16,81	0,28	2,70	11,94	0,20	2,60	0,19
20	1,1	3,50	18,44	0,31	3,00	14,38	0,24	3,15	15,59	0,26	2,60	11,13	0,19	2,70	0,20
30	1,65	3,40	17,62	0,29	3,25	16,41	0,27	3,20	16,00	0,27	2,70	11,94	0,20	2,65	0,19
40	2,2	3,25	16,41	0,27	2,80	12,75	0,21	3,00	14,38	0,24	2,65	11,54	0,19	2,60	0,19
50	2,75	3,25	16,41	0,27	3,00	14,38	0,24	3,25	16,41	0,27	2,60	11,13	0,19	2,65	0,19
60	3,3	3,25	16,41	0,27	2,85	13,16	0,22	3,25	16,41	0,27	2,65	11,54	0,19	2,70	0,20
70	3,85	3,65	19,65	0,33	2,85	13,16	0,22	3,40	17,62	0,29	2,75	12,35	0,21	2,65	0,19
80	4,4	3,25	16,41	0,27	2,75	12,35	0,21	3,50	18,44	0,31	2,60	11,13	0,19	2,65	0,19
90	4,95	3,15	15,59	0,26	2,70	11,94	0,20	3,25	16,41	0,27	2,60	11,13	0,19	2,65	0,19
100	5,5	3,65	19,65	0,33	3,00	14,38	0,24	3,30	16,81	0,28	2,65	11,54	0,19	2,70	0,20
110	6,05	3,40	17,62	0,29	2,90	13,56	0,23	3,50	18,44	0,31	2,90	13,56	0,23	2,65	0,19
120	6,6	3,40	17,62	0,29	2,85	13,16	0,22	3,70	20,06	0,33	2,60	11,13	0,19	2,65	0,19
130	7,15	3,30	16,81	0,28	2,85	13,16	0,22	3,50	18,44	0,31	2,70	11,94	0,20	2,65	0,19
140	7,7	3,15	15,59	0,26	2,80	12,75	0,21	3,60	19,25	0,32	2,70	11,94	0,20	2,65	0,19
150	8,25	3,45	18,03	0,30	2,80	12,75	0,21	3,60	19,25	0,32	2,90	13,56	0,23	2,70	0,20
160	8,8	3,25	16,41	0,27	2,85	13,16	0,22	3,65	19,65	0,33	2,65	11,54	0,19	2,70	0,20
170	9,35	3,35	17,22	0,29	2,90	13,56	0,23	3,60	19,25	0,32	2,65	11,54	0,19	2,70	0,20
180	9,9	3,45	18,03	0,30	2,85	13,16	0,22	3,65	19,65	0,33	2,70	11,94	0,20	2,65	0,19
Srednja vrijednost		0,27				0,20				0,27				0,18	

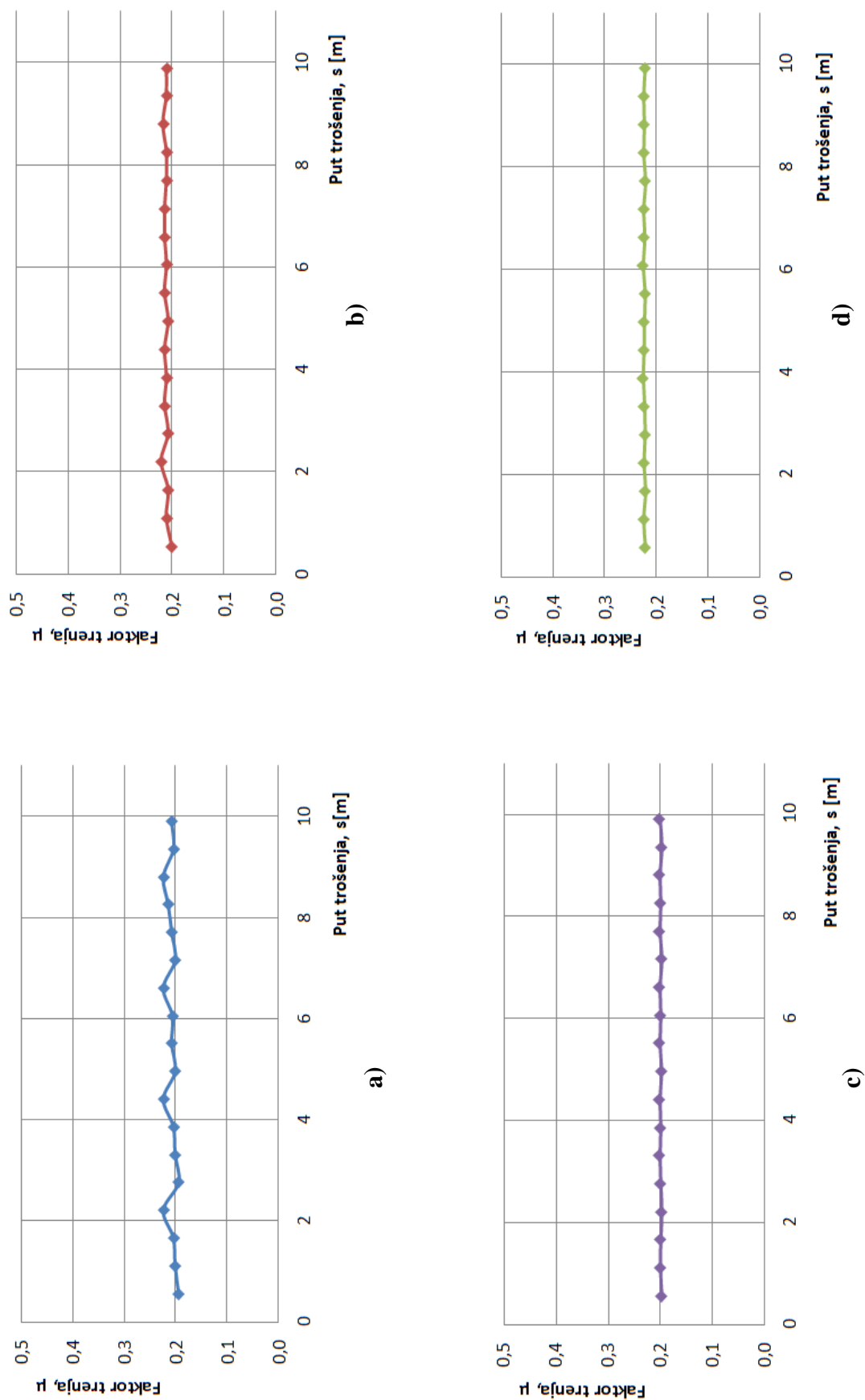
Slika 8. 6. Polazni rezultati ispitivanja otpornosti na adhezijsko trošenje metodom Blok na prstenu za opterećenje  $F_N=60$  N

FN=120 N														
TRIBO PAR			Kvadar 1 - polazni prsten			Kvadar 1 - prsten nitrokarburiran TENIFER			Kvadar 1 - prsten nitriran u plazmi			Kvadar 1 - prsten prevučen TiN/TiCN		
Vrijeme t [s]	Put trošenja s [m]	Otklon $\Delta l_1$ [mm]	Sila trenja Ftr [N]	Faktor trenja $\mu$	Otklon $\Delta l_2$ [mm]	Sila trenja Ftr [N]	Faktor trenja $\mu$	Otklon $\Delta l_3$ [mm]	Sila trenja Ftr [N]	Faktor trenja $\mu$	Otklon $\Delta l_4$ [mm]	Sila trenja Ftr [N]	Faktor trenja $\mu$	
0	0	0,00	-9,98	-0,08	0,00	-9,98	-0,08	0,00	-9,98	-0,08	0,00	-9,98	-0,08	
10	0,55	4,10	23,31	0,19	4,20	24,12	0,20	4,15	23,71	0,20	4,50	26,55	0,22	
20	1,1	4,20	24,12	0,20	4,35	25,34	0,21	4,19	24,04	0,20	4,55	26,96	0,22	
30	1,65	4,25	24,52	0,20	4,30	24,93	0,21	4,18	23,96	0,20	4,50	26,55	0,22	
40	2,2	4,54	26,88	0,22	4,50	26,55	0,22	4,15	23,71	0,20	4,54	26,88	0,22	
50	2,75	4,10	23,31	0,19	4,30	24,93	0,21	4,18	23,96	0,20	4,51	26,64	0,22	
60	3,3	4,20	24,12	0,20	4,40	25,74	0,21	4,20	24,12	0,20	4,52	26,72	0,22	
70	3,85	4,25	24,52	0,20	4,35	25,34	0,21	4,18	23,96	0,20	4,56	27,04	0,23	
80	4,4	4,54	26,88	0,22	4,40	25,74	0,21	4,20	24,12	0,20	4,54	26,88	0,22	
90	4,95	4,20	24,12	0,20	4,30	24,93	0,21	4,16	23,79	0,20	4,53	26,80	0,22	
100	5,5	4,30	24,93	0,21	4,40	25,74	0,21	4,20	24,12	0,20	4,51	26,64	0,22	
110	6,05	4,28	24,77	0,21	4,35	25,34	0,21	4,18	23,96	0,20	4,56	27,04	0,23	
120	6,6	4,54	26,88	0,22	4,40	25,74	0,21	4,20	24,12	0,20	4,52	26,72	0,22	
130	7,15	4,20	24,12	0,20	4,40	25,74	0,21	4,15	23,71	0,20	4,55	26,96	0,22	
140	7,7	4,30	24,93	0,21	4,35	25,34	0,21	4,20	24,12	0,20	4,50	26,55	0,22	
150	8,25	4,40	25,74	0,21	4,35	25,34	0,21	4,18	23,96	0,20	4,55	26,96	0,22	
160	8,8	4,54	26,88	0,22	4,45	26,15	0,22	4,20	24,12	0,20	4,53	26,80	0,22	
170	9,35	4,25	24,52	0,20	4,35	25,34	0,21	4,15	23,71	0,20	4,55	26,96	0,22	
180	9,9	4,30	24,93	0,21	4,35	25,34	0,21	4,20	24,12	0,20	4,51	26,64	0,22	
Srednja vrijednost			0,19			0,20			0,18			0,21		

Slika 8. 7. Polazni rezultati ispitivanja otpornosti na adhezijsko trošenje metodom Blok na prstenu za opterećenje  $F_N=120$  N



Slika 8. 8. Vrijednost faktora trenja o putu trošenja za  $F_N=60$  N za triboparove: a) TiCN - neprevučeno, b) TiCN – nitrokarburirano TENIFER, c) TiCN – nitrirano u plazmi, d) TiCN – prevučeno TiCN



Slika 8. 9. Vrijednost faktora trenja o putu trošenja za  $F_N=120$  N za triboparove: a) TiCN - neprevučeno, b) TiCN – nitrokarburirano TENIFER, c) TiCN – nitrirano u plazmi, d) TiCN – prevučeno TiCN